

## 明 細 書

### 2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置及び2ステージレーザシステム

#### 技術分野

- [0001] 本発明は、シード光を出力する光発振段と、シード光が注入され、このシード光のエネルギーを増幅して出力する光増幅段と、を備えた2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置に関し、またこの2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置と露光装置を備えた2ステージレーザシステムに関する。

#### 背景技術

- [0002] 近年、リソグラフィ用光源としてはエキシマレーザ装置やフッ素分子レーザ装置が検討され、採用されている。このような場合に露光装置のスループットを向上させ且つ超微細加工を均一に行うためには、次の二点が必要とされている。
- [0003] 第一点目はレーザ光の高出力化である。高出力化のためには、レーザ装置から出力されるレーザパルスの1パルスあたりのパルスエネルギーを増加させる方法がある。また、1パルスあたりのパルスエネルギーが低い場合は、繰り返し周波数を増加させる方法によってエネルギー不足分を補うことができる。
- [0004] 第二点目はスペクトルの超狭帯域化である。スペクトルの超狭帯域化のためには、例えば、プリズムとグレーティングで構成される狭帯域化モジュール(Line Narrow Module、以下「LNM」という)の高分解能化による方法や、下記特許文献1に記載されているようなレーザパルスのロングパルス化等による方法がある。
- [0005] しかしながら、LNMの高分解能化やロングパルス化は、一般的に光学的ロスを増加させるため、パルスエネルギーの低下を招く。つまり、スペクトルの超狭帯域化とパルスエネルギーの増加とは相反する関係にある。また、コスト低減ということを前提に考えると、繰り返し周波数の増加、例えば4kHzを超える繰り返し周波数は技術的ハードルが高い。このため、1台のチャンバのみを有するエキシマレーザ装置やフッ素分子レーザ装置において超狭帯域化スペクトルを維持しつつ、繰り返し周波数を増加させて高出力化を実現するには限界がある。

- [0006] そこで、上記二点を共に満たすべく、光発振段及び光増幅段を備えた2ステージレーザが、例えば、下記特許文献2等で提案されている。光発振段及び光増幅段は共にレーザガスが封入され且つ1対の対向する電極が設けられたチャンバを有する。発振用チャンバの電極間で放電が生ずると、レーザガスが励起され励起状態に遷移し、更にこの励起状態から基底状態に遷移する際に光が発生する。この光のエネルギーがある程度増幅されると、発振用レーザからレーザ光(シード光)が出力される。出力されたシード光は増幅用チャンバに注入される。増幅用チャンバの電極間で放電が生ずると、注入されたシード光のエネルギーが増幅されて出力される。
- [0007] この2ステージレーザは大きくは2つの形式に分けられる。一つは、発振用レーザ装置が光発振段に設けられ、光共振器を備えない増幅器が光増幅段に設けられた形式で、MOPA方式(Master oscillator Power amplifier)という。一つは、発振用レーザ装置が光発振段に設けられ、光共振器を備えた増幅用レーザ装置が光増幅段に設けられた形式で、MOPO方式(Master oscillator Power oscillator)という。
- [0008] 光発振段にはLNMが設けられており、スペクトルの超狭帯域化が実現される。一方、光増幅段においては、光発振段から出力され、増幅用チャンバに注入されるシード光の超狭帯域化スペクトルを維持しつつエネルギーのみが増幅される。この2ステージレーザによれば、光増幅段にLNM等の光学的ロスとなる要素が含まれていないため、レーザ発振効率が非常に高い。したがって、所望の超狭帯域化スペクトル及びレーザ出力を得ることが可能となる。所望のレーザ出力は1パルスあたりのパルスエネルギーと繰り返し周波数の積である。例えば、次世代ArFエキシマレーザに要求される性能は、スペクトルが半値幅FWHM(Full Width at Half Maximum)で0. 25 pm以下であり、レーザ出力が繰り返し周波数4kHz動作時で40W以上である。
- [0009] 露光装置に備えられた光学系のダメージを低減するため、光のパルス波形は低ピークパワーであることが望ましい。そこでロングパルス化が求められる。また、高出力化の要請により高繰返し化が求められる。
- [0010] 1台のチャンバのみを有するレーザ装置の場合は、1〜数パルス前、又は1〜数バースト前のパルスの電源電圧(充電電圧)HVとパルスエネルギーとの関係から、次のパルスのための充電電圧HVを予測決定(フィードバック)することにより、一定エネルギー

ギーを得るように制御されている。更に中期的な出力低下を補うために充電電圧HVを上昇させ、また、長期的な出力低下を補うためにレーザガス圧を上昇させるように制御されている。パルスエネルギー積算値を目標範囲内に制御するためには、前パルスまでの積算エネルギーと目標積算エネルギーの差に応じて次のパルスの充電電圧HVが決定され、一定の積算値が得られるように制御されている。

特許文献1: 特開2001-156367号公報

特許文献2: 特開2001-24265号公報(第1図)

### 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

- [0011] 露光装置に使用されるレーザ装置においては、所定パルス数のレーザ発振とレーザ休止とを繰り返すバースト運転を行いながら、高精度なパルスエネルギー制御を行う必要がある。また、上述したように、露光装置の高解像度化及び高スループット化を実現するためには、光源として2ステージレーザを採用することが妥当である。しかしながら、2ステージレーザではバースト運転時の高精度なパルスエネルギー制御手段が確立されていない。
- [0012] リソグラフィ用光源としてレーザ装置を使用する場合、長期間に渡って一定のパルスエネルギーが得られ、また、パルスエネルギー積算値が目標範囲内となるようにレーザ装置のパルスエネルギー制御を行う必要がある。
- [0013] ところが、2ステージレーザのように2台以上のレーザ装置を有する場合は、光発振段のパルスエネルギー変動や光増幅段のパルスエネルギー変動や光発振段と光増幅段との間の同期変動等により、パルス毎にパルスエネルギーが変動する。このため所望のパルスエネルギーを確保しにくい。
- [0014] このように2ステージレーザは高精度なエネルギー制御手段が確立されていないために、安定したパルスエネルギーを供給できないという問題がある。
- [0015] 本発明はこうした実状に鑑みてなされたものであり、2ステージレーザのパルスエネルギー制御を行いパルスエネルギーを安定化させることを解決課題とするものである。

### 課題を解決するための手段

[0016] そこで、第1発明は、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記レーザ光のパルスエネルギーPampを測定するモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギーPampを制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記モニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギーPampが光増幅段の目標エネルギーPatgtとなるように前記光発振段及び前記光増幅段を制御すること

を特徴とする。

[0017] 第1発明においては、光増幅段から出力されたレーザ光のパルスエネルギーPampをモニタモジュールで測定し、その結果に基づき、レーザ光のパルスエネルギーPampが目標エネルギーPatgtとなるように光発振段又は光増幅段を制御する。

[0018] 第2発明は、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード

ド光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定する第1のモニタモジュールと、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定する第2のモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記第1のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ が所定エネルギー $E_{s0}$ 以上となるように前記光発振段を制御し、

前記第2のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように前記光増幅段を制御し、

且つ、前記所定エネルギー $E_{s0}$ は、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ の変動に伴う前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ の変動の割合が所定値以下となるような増幅飽和領域内に設定されていること

を特徴とする。

[0019] また、第3発明は、第2発明において、

前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御すること

を特徴とする。

[0020] また、第4発明は、第2発明において、

前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御する

ことに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする。

[0021] 第2〜第4発明を説明する。光発振段(以下、発振用レーザ)100のパルスエネルギー(増幅段、例えば増幅用レーザ300、に注入されるシード光のパルスエネルギー)  $P_{osc}$ が光増幅段(以下、増幅用レーザを例に取り説明する)300の増幅飽和領域の下限エネルギー  $E_{s0}$ 以上になるように(図7(b)参照)、原則として、発振用レーザ100の発振用高電圧パルス発生器12に設けられた発振用コンデンサ(以下、主コンデンサ)C0の充電電圧(以下、発振用レーザ100の充電電圧)  $V_{osc}$ は一定制御される。すなわち、充電電圧  $V_{osc}$ はパルス毎に制御されない(図7(a)参照)。但し、第1モニタモジュール19でモニタしている発振用レーザ100のパルスエネルギー  $P_{osc}$ が増幅飽和領域の下限エネルギー  $E_{s0}$ を下回った場合にのみ、発振用レーザ100の充電電圧  $V_{osc}$ は増加される。そして、増幅用レーザ300のパルスエネルギー  $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー  $P_{atgt}$ となるように(図7(d)参照)、増幅用レーザ300の増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた増幅用コンデンサ(以下、主コンデンサ)C0の充電電圧(以下、増幅用レーザ300の充電電圧)  $V_{amp}$ がパルス毎に制御される(図7(c)参照)。

[0022] ここで、図6を用いて増幅飽和領域について説明する。シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$ が  $E_{s0}$ 以上の場合(領域2)、シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$ の変化に伴うレーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$ の変化の割合が無視できるほど小さい。つまり、パルスエネルギー  $P_{osc}$ が変動しても増幅後のパルスエネルギー  $P_{amp}$ には影響がないといえる。このシード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$ が  $E_{s0}$ 以上の領域を増幅飽和領域という。

[0023] なお、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の制御は、充電電圧  $V_{osc}$ 及び充電電圧  $V_{amp}$ の制御に加えて、発振用チャンバ10及び増幅用チャンバ30内のレーザガス圧及びレーザガスの組成の少なくとも一方を制御することによっても行うことができる。

[0024] 第2〜第4発明は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入される

レーザ光(シード光)のパルスエネルギーが約 $E_{s0}$ 以上の増幅飽和領域(図6の領域2)である場合、シード光のパルスエネルギーが変動しても、増幅後のパルスエネルギーはほぼ一定であるという特性を利用したものである。よって、増幅後のパルスエネルギーは、増幅用レーザの充電電圧、すなわち増幅用高電圧パルス発生器32の主コンデンサC0の充電電圧によって決定される。

- [0025] 第5発明は、第3発明もしくは第4発明において、  
前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ とを略同一にすること  
を特徴とする。
- [0026] また、第6発明は、第3発明もしくは第4発明において、  
前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ の変化割合と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ の変化割合とを略同一にすること  
を特徴とする。
- [0027] また、第7発明は、第3発明もしくは第4発明において、  
前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ の変化量と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ の変化量とを略同一にすること  
を特徴とする。
- [0028] 第5〜7発明を説明する。発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングと、増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングがそれぞれ一定であったとしても、発振用レーザ100における充電電圧 $V_{osc}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧 $V_{amp}$ の値に応じて、各々のレーザで放電が発生するタイミングは変動する。これは高電圧パルス発生器12、32に設けられた磁気パルス圧縮回路に含まれる磁気スイッチの $V_t$ 積特性の相違によるものである。この変動分は、本発明のパルスエネルギー制御装置によって補正される。
- [0029] しかしながら、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の動作条件(繰り返し周波数、動作時間、稼動デューティ、休止時間など)で各高電圧パルス発生器12、32が有する磁気パルス圧縮回路の構成素子(コンデンサ、磁気スイッチなど)の温度が変化すると、 $V_t$ 積特性自体が変化する。

- [0030] そこで、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{osc}$ と、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{amp}$ とが略同一となるように制御することが望ましい。
- [0031] あるいは、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{osc}$ の変化割合と、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{amp}$ の変化割合とが略同一であるように制御することが望ましい。
- [0032] あるいは、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{osc}$ の変化量と、前記用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0への充電電圧 $V_{amp}$ の変化量とが略同一であるように制御することが望ましい。
- [0033] 第8発明は、
- 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、
- 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、
- 前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定するモニタモジュールと、を備え、
- 前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、
- 前記モニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように前記光発振段を制御するようにし、
- 且つ、前記目標エネルギー $P_{tgt}$ は、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ の変動に伴う前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ の変動の割合が所定値以上となる



ような領域内に設定されていること

を特徴とする。

- [0034] また、第9発明は、第8発明において、  
前記光発振段を制御しても前記レーザ光のパルスエネルギーPampが光増幅段の  
目標エネルギーPatgtとならない場合に、前記光増幅段を制御すること  
を特徴とする。

- [0035] また、第10発明は、第8発明において、  
前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御する  
こと  
を特徴とする。

- [0036] また、第11発明は、第8発明において、  
前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御する  
ことに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なく  
とも一方を制御すること  
を特徴とする。

- [0037] また、第12発明は、第9発明において、  
前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御し、  
前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧Vampを制御する  
こと  
を特徴とする。

- [0038] また、第13発明は、第9発明において、  
前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御する  
ことに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なく  
とも一方を制御し、  
前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧Vampを制御する  
ことに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なく  
とも一方を制御すること  
を特徴とする。

- [0039] 第8ー第13発明を説明する。発振用レーザ100のパルスエネルギー $P_{osc}$  (即ち、増幅用レーザ300に注入されるシード光のパルスエネルギー)が増幅用レーザ300の増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域で運転される。この動作領域では、発振用レーザ100から出力されるシード光のパルスエネルギーの変化に応じて増幅後のパルスエネルギーが変化する(図6参照)。
- [0040] そこで、原則として、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ は一定制御される(パルス毎に制御されない:図19(c)参照)。但し、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ を超えた場合又は増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ が目標エネルギー $P_{tgt}$ でない場合に増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ は増加される。
- [0041] 増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように(図19(d))、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ がパルス毎に制御される(図19(a)参照)。
- [0042] なお、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の制御は充電電圧 $V_{osc}$ 及び充電電圧 $V_{amp}$ の制御に加えて、発振用チャンバ10及び増幅用チャンバ30内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御することによっても行うことができる。
- [0043] 第8ー第13発明は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーが増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域(図6の領域1)である場合、増幅後のパルスエネルギーがシード光のエネルギーの変動に依存するという特性を利用したものである。よって、増幅後のパルスエネルギーは、発振用レーザ100の充電電圧、すなわち発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧によって決定される。
- [0044] 第14発明は、  
内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発

振段と、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定する第1のモニタモジュールと、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定する第2のモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記第1のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ が光発振段の目標エネルギー $P_{otgt}$ となるように前記光発振段を制御し、

前記第2のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{atgt}$ となるように前記光増幅段を制御するようにしたこと

を特徴とする。

[0045] また、第15発明は、第14発明において、

前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御すること

を特徴とする。

[0046] また、第16発明は、第14発明において、

前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御する

ことに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること  
を特徴とする。

[0047] 第14〜第16発明を説明する。発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ がパルス毎に制御（後述する第2oscスパイク制御処理、第2osc毎パルス制御処理）され（図25(a)参照）、第1モニタモジュール19で測定した発振用レーザ100のパルスエネルギー $P_{osc}$ （即ち、増幅用レーザ300に注入されるシード光のパルスエネルギー）が目標エネルギー $P_{otgt}$ にされる（図25(b)参照）。そして、増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー $P_{atgt}$ となるように（図25(d)参照）、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ がパルス毎に制御される（図25(c)参照）。

[0048] なお、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の制御は充電電圧 $V_{osc}$ 及び充電電圧 $V_{amp}$ の制御に加えて、発振用チャンバ10及び増幅用チャンバ30内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御することによっても行うことができる。

[0049] 第14〜第16発明は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光（シード光）のパルスエネルギーを所定の目標エネルギー $P_{otgt}$ となるように維持するものである。目標エネルギー $P_{otgt}$ の設定領域は、増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域（図6の領域1）でも下限エネルギー $E_{s0}$ 以上の領域（図6の領域2）でも構わず任意である。そしてシード光のパルスエネルギーを目標エネルギー $P_{otgt}$ に維持した上で、増幅用レーザ300の充電電圧、すなわち増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧によって増幅後のパルスエネルギーを決定する。

[0050] 第17発明は、  
第1〜第16発明の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置と、前記レーザ光を用いて露光対象を露光する露光装置と、を備えたこと  
を特徴とする。

[0051] また、第18発明は、第17発明において、

前記2ステージレーザは、KrFレーザ、ArFレーザ、フッ素分子レーザのいずれかであること

を特徴とする。

[0052] 第17、第18発明は第1〜第16発明の具体的な実施態様である。

#### 発明の効果

[0053] 第1発明によれば、2ステージレーザのパルスエネルギー制御を行うことができる。

したがって、2ステージレーザのパルスエネルギーを安定させることができる。

[0054] また、第1発明によれば、発振用レーザと増幅用レーザの制御分担を明確に分けて制御することができるため、制御の安定性がよく、誤差が生じ難い。したがって、制御の精度を向上させることができるといえる。

[0055] 第2〜第4発明によれば、第1発明と同じ効果が得られる。

特に、第2〜第4発明において、発振用レーザの制御は、単にシード光のパルスエネルギーを上述した $E_{s0}$ 以上にするという簡便な制御（例えば、発振用レーザの充電電圧を一定にする）でよく、高精度なパルスエネルギー制御は必要ない。実質的に増幅用レーザの制御が厳密に行われるのみである。増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定し、この測定結果に基づいて、増幅用レーザの充電電圧 $V_{amp}$ をパルス毎に制御することにより増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー制御が実現できる。

[0056] また、第2〜第4発明のように、一方が簡便で他方が厳密である制御は容易な制御であるため、コントローラの演算負荷が小さい。したがって、高性能のコントローラを必要としないため、コストを低減できる。

[0057] また、発振用レーザ、増幅用レーザのガス圧、ガス組成を変化させる制御を併用することにより、中期（ガスライフ中）及び長期（レーザチャンバの寿命期間）の出力低下を補うパルスエネルギー制御が可能となり、長期にわたって安定したパルスエネルギー制御が可能となる。

[0058] 第5〜第7発明のように、発振用高電圧パルス発生器のコンデンサへの充電電圧と、増幅用高電圧パルス発生器のコンデンサへの充電電圧、又は両充電電圧の変化割合、又は両充電電圧の変化量のうちの少なくとも一つが略同一となるように制御す

ることにより、 $V_t$ 積特性自体の変化の影響を小さくすることができる。

[0059] また、第5ー第7発明のように、両充電電圧の関係を設定することにより、シード光の出力変動がレーザ光のパルスエネルギーに及ぼす影響が小さくなり、2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御が良好になるという効果に加えて、発振用レーザと増幅用レーザとの同期変動に起因する2ステージレーザのパルスエネルギーの変動幅を小さくすることが可能となる。

[0060] 第8ー第13発明によれば、第1発明と同じ効果が得られる。

特に、第8ー第13発明において、増幅用レーザの制御は、シード光のパルスエネルギー制御によって増幅後のレーザ光のパルスエネルギーが目標エネルギー $P_{atgt}$ となるような増幅強度（すなわち、増幅用レーザの電極間への印加電圧の値）を維持する程度の簡便な制御（例えば、増幅用レーザの充電電圧を一定にする）でよく、実質的に発振用レーザの制御が厳密に行われるのみである。増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定し、この測定結果に基づいて、発振用レーザの充電電圧 $V_{osc}$ をパルス毎に制御することにより増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー制御が実現できる。

[0061] また、第8ー第13発明のように、一方が簡便で他方が厳密である制御は容易な制御であるため、コントローラの演算負荷が小さい。したがって、高性能のコントローラを必要としないため、コストを低減できる。

[0062] また、発振用レーザ、増幅用レーザのガス圧、ガス組成を変化させる制御を併用することにより、中期（ガスライフ中）及び長期（レーザチャンバの寿命期間）の出力低下を補うパルスエネルギー制御が可能となり、長期にわたって安定したパルスエネルギー制御が可能となる。

[0063] 第14ー第16発明によれば、第1発明と同じ効果が得られる。

特に、第14ー第16発明によれば、発振用レーザから出力され増幅用レーザに注入されるレーザ光（シード光）のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定し、この測定結果に基づいて、発振用レーザの充電電圧 $V_{osc}$ をパルス毎に制御し、一方、増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定し、この測定結果に基づいて、増幅用レーザの充電電圧 $V_{amp}$ をパルス毎に制御しているので、増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー

一制御が実現できる。

- [0064] また、第14～第16発明では、シード光のパルスエネルギーを高精度に制御しているので、シード光のエネルギー変動による増幅後のレーザ光のパルスエネルギーへの影響を低減できる。仮に、シード光の目標エネルギーPotgtが増幅飽和領域内にあった場合、第2～4発明よりも、シード光のエネルギー変動による増幅後のレーザ光のパルスエネルギーへの影響をさらに小さくできる。一方、発振用レーザ、増幅用レーザ両者とも厳密な精度を行うので、第2～4発明と比較すれば、コントローラの演算負荷は大きい。

### 発明を実施するための最良の形態

- [0065] 以下に、本発明の実施形態を図面を参照して説明する。

[0066] [構成]

図1は本実施形態に係るレーザシステムの構成図である。また、図2(a)は発振用チャンバ及びその近傍の構成図であり、図2(b)は増幅用チャンバ及びその近傍の構成図である。図1ではMOPO方式の2ステージレーザ装置を示している。

- [0067] 2ステージレーザ装置2においては、発振用レーザ(osc)100でシード光(種レーザ光)が生成され狭帯域化される。そして、増幅用レーザ(amp)300でそのシード光が増幅される。すなわち、発振用レーザ100から出力されるレーザ光のスペクトル特性によってレーザシステム全体のスペクトル特性が決定され、増幅用レーザ300によってレーザシステム自体のレーザ出力(エネルギーまたはパワー)が決定される。増幅用レーザ300から出力されるレーザ光は露光装置3に入力され、このレーザ光は露光対象(例えばウエハ)の露光に用いられる。
- [0068] 発振用レーザ100は発振用チャンバ10と、充電器11と、発振用高電圧パルス発生器12と、ガス供給・排気ユニット14と、冷却水供給ユニット15と、LNM16と、フロントミラー17と、第1モニタモジュール19と、放電検出部20と、で構成される。
- [0069] 増幅用レーザ300は増幅用チャンバ30と、充電器31と、増幅用高電圧パルス発生器32と、ガス供給・排気ユニット34と、冷却水供給ユニット35と、リア側ミラー36と、出力ミラー37と、第2モニタモジュール39と、で構成される。
- [0070] ここで発振用レーザ100と増幅用レーザ300について説明するが、その構成は同

一する部分があるため、その部分に関しては発振用レーザ100を代表して説明する。

[0071] 発振用チャンバ10の内部には、所定距離だけ離隔し、互いの長手方向が平行であって且つ放電面が対向する一対の電極(カソード電極及びアノード電極)10a、10bが設けられる。これらの電極10a、10bには、充電器11と発振用高電圧パルス発生器12と、で構成された電源によって高電圧パルスが印加される。すると、電極10a、10b間で放電が生じ、この放電によって発振用チャンバ10内に封入されたレーザガスが励起される。この電源の一例を図3に示す。

[0072] 図3は電源及びチャンバ内部の回路構成の一例を示す図である。

図3(a)に示す発振用高電圧パルス発生器12は、可飽和リアクトルからなる3個の磁気スイッチSR1、SR2、SR3を用いた2段の磁気パルス圧縮回路である。磁気スイッチSR1は固体スイッチSWでのスイッチングロスを低減するために設けられたものであり、磁気アシストとも呼ばれる。例えば、この固体スイッチSWにはIGBT等の半導体スイッチング素子が用いられる。なお、図3(a)の回路を用いる代わりに、図3(b)の回路を用いてもよい。図3(b)は磁気パルス圧縮回路に加え昇圧トランスTr1を含む回路であり、図3(b)は昇圧トランスの代わりに主コンデンサC0の充電用のリアクトルL1を含む例である。

[0073] 以下に図3(a)にしたがって、回路の構成と動作を説明する。なお、図3(b)の回路は昇圧トランスにより昇圧される動作が無いだけで、他の動作は図3(a)の回路と同様なので、説明を省略する。また、発振用レーザ100の電源と増幅用レーザ300の電源の構成及び動作は同じであるため、増幅用レーザ300の電源の説明を省略する。

[0074] 充電器11の電圧は所定の値HVに調整され、主コンデンサC0が充電される。このとき、固体スイッチSWはオフになっている。主コンデンサC0の充電が完了し、固体スイッチSWがオンとなったとき、固体スイッチSWの両端にかかる電圧は主に磁気スイッチSR1の両端にかかる。磁気スイッチSR1の両端にかかる主コンデンサC0の充電電圧V0の時間積分値が磁気スイッチSR1の特性で決まる限界値に達すると、磁気スイッチSR1が飽和して導通状態となる。すると、主コンデンサC0、磁気スイッチSR1、



昇圧トランスTr1の1次側、固体スイッチSWのループに電流が流れる。同時に、昇圧トランスTr1の2次側、コンデンサC1のループに電流が流れ、主コンデンサC0に蓄えられた電荷がコンデンサC1に移行し、コンデンサC1が充電される。

[0075] コンデンサC1における電圧V1の時間積分値が磁気スイッチSR2の特性で決まる限界値に達すると、磁気スイッチSR2が飽和して導通状態となる。すると、コンデンサC1、コンデンサC2、磁気スイッチSR3のループに電流が流れ、コンデンサC1に蓄えられた電荷がコンデンサC2に移行し、コンデンサC2が充電される。

[0076] コンデンサC2における電圧V2の時間積分値が磁気スイッチSR3の特性で決まる限界値に達すると、磁気スイッチSR3が飽和して導通状態となる。すると、コンデンサC2、ピーキングコンデンサCp、磁気スイッチSR3のループに電流が流れ、コンデンサC2に蓄えられた電荷がピーキングコンデンサCpに移行し、ピーキングコンデンサCpが充電される。

[0077] 図3(a)に示すように、発振用チャンバ10内には、第1電極91と、誘電体チューブ92と、第2電極93とからなる予備電離手段が設けられている。予備電離のためのコロナ放電は、第1電極91が挿入されている誘電体チューブ92と第2電極93とが接触している個所を基点として誘電体チューブ92の外周面に発生する。ピーキングコンデンサCpの充電が進むにつれてその電圧Vpが上昇し、電圧Vpが所定の電圧になると誘電体チューブ92の外周面にコロナ放電が発生する。このコロナ放電によって誘電体チューブ92の外周に紫外線が発生し、一對の電極10a、10b間のレーザガスが予備電離される。

[0078] ピーキングコンデンサCpの充電がさらに進むにつれて、ピーキングコンデンサCpの電圧Vpが上昇する。この電圧Vpがある値(ブレイクダウン電圧)Vbに達すると、一對の電極10a、10b間のレーザガスが絶縁破壊されて主放電が開始される。この主放電によりレーザ媒質が励起される。そして、発振用レーザ100の場合はシード光が発生し、増幅用レーザ300(もしくは増幅器)の場合は注入されたシード光が増幅される。主放電によりピーキングコンデンサCpの電圧は急速に低下し、やがて充電開始前の状態に戻る。

[0079] 固体スイッチSWのスイッチング動作によってこのような放電動作が繰り返し行なわ

れることで、パルスレーザ発振が行われる。固体スイッチSWのスイッチング動作は、外部からのトリガ信号に基づき行われる。このトリガ信号を送出する外部コントローラは、例えば、後述する同期コントローラ8である。

[0080] 本実施形態では、磁気スイッチSR2、SR3及びコンデンサC1、C2で2段の容量移行型回路が構成されている。容量移行型回路では、後段に行くにつれて各段のインダクタンスを小さくするように設定すれば、各段を流れる電流パルスのパルス幅が順次狭くなるようなパルス圧縮動作が実現される。結果として、一对の電極10a、10b間、一对の電極30a、30b間に短パルスの強い放電が実現される。

[0081] ここで図1に戻り、他の構成の説明をする。

発振用チャンバ10の内部には、ガス供給・排気ユニット14から供給されるレーザガスが封入される。ガス供給・排気ユニット14には、発振用チャンバ10内にレーザガスを供給するガス供給系と、発振用チャンバ10内のレーザガスを排気するガス排気系とが設けられる。本レーザ装置がフッ素分子(F<sub>2</sub>)レーザとして使用される場合は、ガス供給・排気ユニット14は、フッ素(F<sub>2</sub>)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファガスとを発振用チャンバ10に供給する。また、本レーザ装置がKrFエキシマレーザとして使用される場合は、ガス供給・排気ユニット14は、クリプトン(Kr)ガス及びフッ素(F<sub>2</sub>)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファガスとを発振用チャンバ10に供給する。また、本レーザ装置がArFエキシマレーザとして使用される場合は、ガス供給・排気ユニット14は、アルゴン(Ar)ガス及びフッ素(F<sub>2</sub>)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファガスとを発振用チャンバ10に供給する。各ガスの供給及び排気はガス供給・排気ユニット14の各バルブの開閉で制御される。

[0082] また、発振用チャンバ10の内部には、クロスフローファン10cが設けられる。クロスフローファン10cによってレーザガスがチャンバ内で循環され、電極10a、10b間に送り込まれる。

[0083] また、発振用チャンバ10の内部には、熱交換器10dが設けられる。熱交換器10dは冷却水によって発振用チャンバ10内の排熱を行う。冷却水は冷却水供給ユニット15から供給される。冷却水の供給は冷却水供給ユニット15のバルブの開閉で制御

される。

- [0084] 発振用チャンバ10において、レーザ光の光軸上であってレーザ光出力部分には、ウィンドウ10e、10fが設けられる。ウィンドウ10e、10fはレーザ光に対して透過性がある材料、例えばCaF<sub>2</sub>等、で形成される。両ウィンドウ10e、10fは、外側の面が互いに平行に配置され、また、レーザ光に対して反射損失を低減すべくブリュースタ角で設置され、更にレーザ光の直線偏光方向がウィンドウ面に対して垂直になるように設置される。
- [0085] 圧力センサPIは、発振用チャンバ10内のガス圧力をモニタしており、ガス圧力を示す信号をユーティリティコントローラ5に出力する。ユーティリティコントローラ5は後述する処理に基づいて、ガス供給・排気ユニット14に各バルブの開閉及びその開度（又はガス流量）を指示する信号を生成し出力する。すると、ガス供給・排気ユニット14が各バルブの開閉を制御するため、発振用チャンバ10内のガス組成やガス圧力が制御される。
- [0086] レーザ出力はガス温度によって変化する。そこで、温度センサTIは、発振用チャンバ10内の温度をモニタしており、温度を示す信号をユーティリティコントローラ5に出力する。ユーティリティコントローラ5は発振用チャンバ10内の所望温度にすべく、冷却水供給ユニット15にバルブの開閉及びその開度（又は冷却水流量）を指示する信号を生成し出力する。すると、冷却水供給ユニット15がバルブの開閉を制御するため、発振用チャンバ10内の熱交換器10dに供給される冷却水の流量すなわち排熱量が制御される。
- [0087] 発振用チャンバ10の外部であり、ウィンドウ10e側のレーザ光の光軸上にはLNM16が設けられ、ウィンドウ10f側のレーザ光の光軸上にはフロントミラー17が設けられる。LNM16は、例えば拡大プリズムと波長選択素子であるグレーティング（回折格子）等の光学素子で構成される。また、LNM16は波長選択素子であるエタロンと全反射ミラー等の光学素子で構成される場合もある。このLNM16内の光学素子とフロントミラー17とでレーザ共振器が構成される。
- [0088] 第1モニタモジュール19はフロントミラー17を透過したレーザ光のエネルギーや出力線幅や中心波長等のレーザビーム特性をモニタする。第1モニタモジュール19は

レーザ光の中心波長を示す信号を生成し、この信号を波長コントローラ6に出力する。また、第1モニタモジュール19はレーザ光のエネルギーを測定し、このエネルギーを示す信号をエネルギーコントローラ7に出力する。

- [0089] なお、増幅用チャンバ30の電極30a、30b、クロスフローファン30c、熱交換器30d、ウィンドウ30e、30fの構成及び機能は、上述した発振用チャンバ10の各部の構成及び機能と同じである。また、増幅用レーザ300に設けられた充電器31、増幅用高電圧パルス発生器32、ガス供給・排気ユニット34、冷却水供給ユニット35、第2モニタモジュール39、圧力センサP2、温度センサT2の構成及び機能は、上述した発振用レーザ100側に設けられた同一要素の構成及び機能と同じである。
- [0090] 一方、増幅用レーザ300には、発振用レーザ100で設けられたLNM等からなる共振器に代わり、次に述べる不安定共振器が設けられる。
- [0091] 増幅用チャンバ30の外部であり、ウィンドウ30e側のレーザ光の光軸上にはリア側ミラー36が設けられ、ウィンドウ30f側のレーザ光の光軸上には出力ミラー37が設けられる。リア側ミラー36と出力ミラー37とで不安定型共振器が構成される。リア側ミラー36の反射面は凹面であって、その中央部にはミラー後方側から反射面側へレーザ光を通過させる孔が設けられる。リア側ミラー36の反射面はHR (High Reflection) コートが施される。出力ミラー37の反射面は凸面であって、その中央部にはHR (High Reflection) コートが施され、中央部周囲にはAR (Anti Reflection) コートが施される。なお、リア側ミラー36としては、中央に孔が開いたものを使用するのではなく、孔に相当する部分のみARコートが施されたミラー基板を使用してもよい。また、不安定共振器でなく安定共振器でもよい。
- [0092] 発振用レーザ100のフロントミラー17と増幅用レーザ300のリア側ミラー36との間には、反射ミラーを含むビーム伝搬部42が設けられる。
- [0093] フロントミラー17を透過したレーザ光はビーム伝搬部42によってリア側ミラー36まで案内される。更にこのレーザ光はリア側ミラー36の孔を通過し、増幅用チャンバ30内を通過し、出力ミラー37の中央部で反射される。出力ミラー37で反射されたレーザ光は、増幅用チャンバ30内を通過し、リア側ミラー36の孔周囲で反射される。更に、リア側ミラー36で反射されたレーザ光は、増幅用チャンバ30内を通過し、出力ミラ

一37の中央部周囲を透過し出力される。レーザ光が増幅用チャンバ30の放電部すなわち電極30a、30b間を通過する際に放電が発生すると、レーザ光のパワーは増幅される。

[0094] 波長コントローラ6にはモニタモジュール19、39からの信号が入力される。波長コントローラ6はレーザ光の中心波長を所望の波長にすべくLNM16内の波長選択素子(グレーティング、エタロン等)の選択波長を変化させる信号を生成し、この信号をドライバ21に出力する。波長選択素子の選択波長は、例えば、波長選択素子へ入射するレーザ光の入射角を変化させることにより変化する。ドライバ21は、受信した前記信号に基づき、波長選択素子へ入射するレーザ光の入射角が変化するように、LNM16内の光学素子(例えば、拡大プリズム、全反射ミラー、グレーティング等)の姿勢角等を制御する。なお、波長選択素子の波長選択制御はこれに限られるものではない。例えば、波長選択素子がエアギャップエタロンの場合、LNM16内のエアギャップ内の気圧(窒素等)を制御してもよいし、ギャップ間隔を制御してもよい。

[0095] エネルギーコントローラ7にはモニタモジュール19、39の出力信号が入力される。また、図1に示すように、露光装置3に出力モニタ51を設け、その出力信号がエネルギーコントローラ7に直接入力されるようにしてもよい。また、露光装置3の出力モニタ51の出力信号を露光装置3のコントローラ52に入力し、このコントローラ52がレーザ内部に搭載されたエネルギーコントローラ7に信号を送出するようにしてもよい。エネルギーコントローラ7は後述する処理に基づいて、パルスエネルギーを所望の値にすべく次回充電電圧 $V_{osc}$ 、 $V_{amp}$ を示す信号を生成し、この信号を同期コントローラ8に出力する。

[0096] 同期コントローラ8にはエネルギーコントローラ7からの信号と、放電検出器20、40から出力される各チャンバ10、30における放電開始を知らせる信号とが入力される。同期コントローラ8はエネルギーコントローラ7からの信号に基づいて、充電器11の充電電圧を制御する。ところで、発振用チャンバ10の放電と増幅用チャンバ30の放電のタイミングがずれると、発振用チャンバ10から出力されたレーザ光は増幅用チャンバ30で効率よく増幅されない。そこで、発振用チャンバ10から出力されたレーザ光(シード光)が増幅用チャンバ30内の一対の電極30a、30b間の放電領域(励起領域

)に満たされたタイミングで増幅用チャンバ30において放電する必要がある。

- [0097] ここで発振用レーザ100と増幅用レーザ300の放電タイミングについて説明する。先に述べたように、発振用チャンバ10内の電極10a、10b間、及び増幅用チャンバ30内の電極30a、30b間に立上り時間の速い高電圧パルスを印加するために、それぞれ磁気パルス圧縮回路を有する発振用高電圧パルス発生器12と、増幅用高電圧パルス発生器32が用いられる。一般的に、各高電圧パルス発生器12、32の磁気パルス圧縮回路で用いられる磁気スイッチSR2、SR3は可飽和リアクトルである。主コンデンサC0からエネルギー(電圧パルス)が転送される場合、この磁気スイッチSR2、SR3にかかる電圧(V:すなわち主コンデンサC0の充電電圧)と磁気スイッチSR2、SR3によってパルス圧縮されて転送される電圧パルスの転送時間(t)との積(Vt積)の値は一定という関係がある。例えば、主コンデンサC0の充電電圧が高くなると、電圧パルスの転送時間(すなわち、磁気スイッチがオン状態である時間)が短くなる。
- [0098] 図4、図5は、高電圧パルス発生器の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極間に放電が発生するまでの時間と主コンデンサC0の充電電圧との関係を示す図である。
- [0099] 図4は、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300における充電電圧設定範囲が同一である例を示すものである。ここには、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲、すなわち充電器11の電圧設定範囲が $V_{c1} \sim V_{c2}$  ( $V_{c1} < V_{c2}$ )である場合の特性カーブAと、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲、すなわち充電器31の電圧設定範囲が $V_{c1} \sim V_{c2}$  ( $V_{c1} < V_{c2}$ )である場合の特性カーブBと、が示されている。
- [0100] 二つの特性カーブA、Bのずれは、各高電圧パルス発生器12、32がそれぞれ有する磁気パルス圧縮回路の設計の違い(回路定数の違い)、あるいは同じ設計でも磁気パルス発生回路を構成する回路素子の個体差によって発生するものである。
- [0101] 図4から明らかなように、発振用レーザ100における充電電圧が $V_{c2}$ であり、増幅用レーザ300における充電電圧が $V_{c1}$ である場合は、各固体スイッチSWがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれが最大値T1となる。
- [0102] また、発振用レーザ100における充電電圧、増幅用レーザ300における充電電圧

が共に電圧 $V_{c1}$ である場合は、各固体スイッチSWがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれが $T2$ となり、共に電圧 $V_{c2}$ である場合は、ずれが $T3$ となる(図4の例では、 $T2 > T3$ )。

- [0103] 一方、図5は、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300における充電電圧設定範囲が相違する例を示すものである。ここには、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲、すなわち充電器11の電圧設定範囲が $V_{co1} \sim V_{co2}$  ( $V_{co1} < V_{co2}$ ) である場合の特性カーブCと、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲、すなわち充電器31の電圧設定範囲が $V_{ca1} \sim V_{ca2}$  ( $V_{ca1} < V_{ca2}$ ) である場合の特性カーブDと、が示されている。
- [0104] 図5から明らかなように、発振用レーザ100における充電電圧が $V_{co2}$ であり、増幅用レーザ300における充電電圧が $V_{ca1}$ である場合は、各固体スイッチSWがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれが最大値 $T1$ となる。
- [0105] また、発振用レーザ100における充電電圧が $V_{co1}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧が $V_{ca1}$ である場合は、各固体スイッチSWがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれが $T2$ となり、発振用レーザ100における充電電圧が $V_{co2}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧が $V_{ca2}$ である場合は、ずれが $T3$ となる(図5の例では、 $T2 > T3$ )。
- [0106] このように、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングと増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングがそれぞれ一定であったとしても、発振用レーザ100における充電電圧 $V_{osc}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧 $V_{amp}$ の値に応じて、各々のレーザで放電が発生するタイミングは変動する。
- [0107] このため、同期コントローラ8はエネルギーコントローラ7からの信号(充電電圧 $V_{osc}$ 、 $V_{amp}$ )と放電検出器20、40からの信号に基づいて、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWへのトリガ信号に対する増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWへのトリガ信号の遅延時間を決定する。
- [0108] すなわち、同期コントローラ8は、エネルギーコントローラ7から受け取った次回放電

のための充電電圧信号(電圧 $V_{osc}$ 、 $V_{amp}$ )から、上述した電圧と転送時間との $V_t$ 積特性を考慮して遅延時間を決定する。

- [0109] また、同期コントローラ8は、実際の放電タイミングの測定結果である放電検出器20、40からの信号に基づいて、前記遅延時間をフィードバック補正する。
- [0110] 各々のレーザで放電が発生するタイミングは、各チャンバ内に充填されたレーザガスの圧力によっても変化する。一般的には、電極間で放電が発生するときにレーザガスの圧力が高いと電極に印加される電圧は高くなる。よって、レーザガスの圧力が高くなると、同期コントローラ8からのトリガ信号によって、各高電圧パルス発生器12、32の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極10a、10b間、電極30a、30b間に放電が発生するまでの時間も長くなる。上述したフィードバック補正では、こういった $V_t$ 積特性以外の要因での放電タイミングのずれを補正する。
- [0111] そして、同期コントローラ8は、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWにトリガ信号を出力した後、決定した遅延時間が経過した時点で、増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWにトリガ信号を出力する。
- [0112] 当然ながら、各高電圧パルス発生器12、32のそれぞれに設けられた主コンデンサC0の充電電圧(すなわち、充電器11、31の設定電圧)の値によっては、遅延時間が負の値を取る場合がある。すなわち、同期コントローラ8は、先に増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWにトリガ信号を出力した後、決定した遅延時間が経過した時点で、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWにトリガ信号を出力する場合もある。
- [0113] また、本制御形態では、同期コントローラ8は、放電検出器20、40により検出される発振用チャンバ10、増幅用チャンバ30における放電の発生タイミングを、遅延時間を定めるための情報としているが、これに限るものではない。
- [0114] 例えば、第1モニタモジュール19で検出した発振用レーザ100のレーザ光が出力されるタイミングと、第2モニタモジュール39で検出した増幅用レーザ300のレーザ光が出力されるタイミングとを用いてもよい。
- [0115] また、第1モニタモジュール19で検出した発振用レーザ100のレーザ光が出力されるタイミングと放電検出器40により検出した増幅用チャンバ30における放電の発生タ



イミングとを用いてもよい。

[0116] ユーティリティーコントローラ5と波長コントローラ6とエネルギーコントローラ7はメインコントローラ4に接続される。更に露光装置3(例えば、コントローラ52)はメインコントローラ4に接続される。メインコントローラ4は露光装置3からの指令信号に基づき、各コントローラ5〜7に制御分担を振り分ける。その指令に従い各コントローラ5〜7は処理を行う。

[0117] 以上、MOPO方式のレーザ装置の構成について説明したが、MOPA方式のレーザ装置の場合は、増幅用チャンバ30にリア側ミラー36と出力ミラー37を設けない構成になる。なお、MOPA方式では、光が増幅用チャンバ30内を通過する回数は1回であるが、これに限るものではない。例えば、折り返しミラーを設けて、増幅用チャンバを複数回通過させてもよい。このように構成することにより、より高い出力のレーザ光を取り出すことが可能となる。

[0118] [本発明の基本的な考え方]

ここで、2ステージレーザにおける増幅用レーザに注入されるシード光のパルスエネルギーと増幅後のパルスエネルギーの特性を用いて、本発明のパルスエネルギー制御についての基本的な考え方について説明する。

[0119] 図6は増幅用レーザに注入されるシード光のパルスエネルギーと増幅後のパルスエネルギーの関係を示す図である。

2ステージレーザにおいて、増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーと増幅用レーザ300から出力されるレーザ光のパルスエネルギーは、図6に示すような関係にある。曲線A〜Cは増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧(すなわち、充電器31の設定電圧)をHV1、HV2、HV3( $HV1 > HV2 > HV3$ )としたときに得られる特性である。

[0120] 図6に示されるように、増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーが約 $E_{s0}$ 未満の領域(領域1という)である場合は、シード光のエネルギーが増加するに伴い、増幅後のパルスエネルギーは増加する。一方、増幅用レーザ300に注入されるシード光のエネルギーが約 $E_{s0}$ 以上の領域(領域2という)である場合は、シード光のエネルギーが増加しても、増幅後のパルスエネルギーはほぼ一定

である。このように領域2では増幅後のパルスエネルギーがほとんど増加しない飽和状態にあることから、この領域2を増幅飽和領域という。シード光のエネルギーが増幅飽和領域内で変動したとしても、増幅後のパルスエネルギーへの影響は小さい。このことから、発振用レーザ100では出力するレーザ光のパルスエネルギーを増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以上にする制御を行い、増幅用レーザ300では出力するレーザ光のパルスエネルギーを目標パルスエネルギーにする制御を行うのが2ステージレーザの最も容易な制御方法であるといえる。後述する第1の制御例はこの考えに基づくものである。しかし後述する第2ー第3の制御例のようにすることも可能である。

[0121] 図6によると、領域1、2に関わらず、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧 $V_{amp}$ が高い程、増幅後のレーザ光のパルスエネルギーが大きいことが分かる。したがって、充電電圧 $V_{amp}$ を制御することで増幅後のパルスエネルギーを制御できるといえる。すなわち、充電電圧 $V_{amp}$ の制御を毎パルス制御（後述するampスパイク制御処理、amp毎パルス制御処理、amp露光量一定制御処理等）とすることで高精度なエネルギー制御が可能となる。なお、図示しないが充電電圧 $V_{amp}$ を制御するのではなく、増幅用チャンバ30内のレーザガス圧やレーザガスの組成を制御した場合でも同じ様な曲線AーCが得られる。具体的には、レーザの全ガス圧を高くすることにより、パルスエネルギーを増加させることができる。ガス組成の制御に関しては、例えば、レーザ発振により、フッ素( $F_2$ )ガスが減少した分を供給することによって、レーザの出力を回復することができる。したがって、充電電圧 $V_{amp}$ と同様に、レーザガス圧やレーザガスの組成を制御することで出力されるレーザ光のパルスエネルギーを制御できるといえる。ただし、ガス制御は充電電圧制御に比べて、応答性が遅いために毎パルスのパルスエネルギーの制御はできない。ガス制御の方法に関しては後述する。

[0122] なお、MOPA方式の2ステージレーザも、増幅器に注入されるシード光のエネルギーと増幅後のパルスエネルギーの関係は、増幅用レーザのものと同様である。このため、基本的に同様な考え方で、MOPA方式の2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御を行うことが可能である。ただし、MOPO方式の場合と

MOPA方式の場合との異なる点は、増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ がMOPO方式の方がかなり小さくなる。すなわち、MOPO方式の方が発振用レーザのパルスエネルギー(シード光のエネルギー)が小さくてよいので、発振用レーザを動作させるための投入エネルギー(すなわち、商用電源からのエネルギー)が小さくてよい。よって、2ステージレーザ全体としての運転効率が高くなる。

[0123] [制御例]

次に本発明による各制御例について説明する。

[0124] [1. 第1の制御例]

図7は第1の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。図7に示す個々の矩形波等は1バーストの充電電圧、パルスエネルギーを示す。

第1の制御例は、目標とするパルスエネルギーに応じて、発振用レーザ100の発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧(以下、発振用レーザ100の充電電圧又は単に充電電圧という)を一定にすると共に、増幅用レーザ300の増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧(以下、増幅用レーザ300の充電電圧又は単に充電電圧という)を変化させるものである。

[0125] 第1の制御例の概要を説明する。発振用レーザ100のパルスエネルギー(すなわち、増幅用レーザ300に注入されるシード光のパルスエネルギー) $P_{osc}$ が増幅用レーザ300の増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以上になるように(図7(b)参照)、原則として、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ は一定制御される。すなわち、充電電圧 $V_{osc}$ はパルス毎に制御されない(図7(a)参照)。但し、第1モニタモジュール19でモニタしている発振用レーザ100のパルスエネルギー $P_{osc}$ が前記増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ を下回った場合にのみ、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ は増加される。そして、増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように(図7(d)参照)、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ がパルス毎に制御される(図7(c)参照)。

[0126] なお、レーザ光の検出は増幅用レーザ300の出口に限らない。増幅用レーザ300から露光装置3の露光対象(例えば、ウエハ)までの光路の任意の地点でレーザ光を

検出してパルスエネルギーPampを測定し、その測定結果に基づいて、増幅用レーザ300を制御することもできる。

[0127] なお、レーザ光の検出は増幅用レーザ300の出口近傍よりも、上述した光路中、特に露光対象（例えば、ウェハ）に出来るだけ近い地点で行うことが望ましい。増幅用レーザ300から出力されたレーザ光は、増幅用レーザ300の出口から露光対象に到達するまでに、多数の光学素子及びスリット等を透過する。ここで、例えば、レーザ光のビームプロファイルやレーザ光の出射軸が変化すると、増幅用レーザ300の出口近傍では出力されたレーザ光のパルスエネルギーはほとんど変化しないのに対し、露光対象上でのパルスエネルギーは顕著に変化する。したがって、増幅用レーザ300の出口近傍ではない地点でレーザ光を検出してパルスエネルギーPampを測定することにより、露光対象に影響を及ぼすレーザ光のパルスエネルギーPampの変動を精度よく検出することが可能となる。特に、露光対象にできるだけ近い所でレーザ光を検出して、そのパルスエネルギーPampに基づいて2ステージレーザを制御することによって、結果的に露光装置における露光量の制御を高精度に行うことが可能となる。

[0128] 以下では、2通りの運転方法（[1-1]、[1-2]）を例にあげて、第1の制御例を説明する。なお、ここではMOPO方式の2ステージレーザの場合について説明するが、MOPA方式の2ステージレーザの場合も、同様の制御となる。

[0129] [1-1. 増幅用レーザ：スパイク制御及び毎パルス制御]

図8は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

図8に示す制御では、増幅用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目からNパルス目までは増幅用レーザ300によるスパイク制御処理（以下、ampスパイク制御処理という）が行われ、N+1パルス目からMパルス目までは増幅用レーザ300による毎パルス制御処理（以下、amp毎パルス制御処理という）が行われる。なお、各処理の説明では、具体的なパルス数としてN=3、M=1000という数値を用いている。

[0130] 発振用レーザ100と増幅用レーザ300は同期運転されており、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の発振タイミングは同期コントローラ8によって制御されている。具体的には、発振用チャンバ10の電極10a、10b間で放電することによって出力されるシード光が、増幅用レーザ300の増幅用チャンバ30内に注入され、電極30a、30b

間の放電領域(励起領域)に満たされた時に、電極30a、30b間で放電すれば最も効率的にシード光が増幅される。シード光の増幅を効率的に行うために、同期コントローラ8は、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWに出力するトリガ信号と増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWに出力するトリガ信号との間に遅延時間を設ける。

[0131] まず、図8(a)を用いて発振用レーザ100の制御について説明する。

図8(a)で示すように、発振用レーザ100では、最初にレーザ発振パルスカウンタ(以下パルスカウンタという)koにゼロが設定される(ステップS511)。エネルギーコントローラ7では発振用レーザ100の充電電圧Voscに予め定められた初期値が設定され(ステップS512)、パルスカウンタkoに1がインクリメントされる(ステップS513)。ここでパルスカウンタkoがM+1[=1001]未満であれば、設定された充電電圧Voscにてレーザ発振が行われる(ステップS514の判断YES、ステップS515)。第1モニタモジュール19ではパルスエネルギーPosc(ko)が測定され、このパルスエネルギーPosc(ko)を示す信号がエネルギーコントローラ7に出力される(ステップS516)。

[0132] パルスエネルギーPosc(ko)が増幅飽和領域の下限エネルギーEs0以上である場合は、上述したステップS513以降の処理が行われ、前パルスと同一の充電電圧Voscにてレーザ発振は継続される(ステップS517の判断YES)。しかし、レーザ発振の継続に伴いレーザガスは劣化していき、充電電圧Voscが一定の値に維持され、且つ、後述するようなレーザガスの制御が行われない場合、パルスエネルギーPoscは低下していく。そこで、パルスエネルギーPosc(ko)が下限エネルギーEs0を下回った場合は、パルスエネルギーPoscを下限エネルギーEs0以上にすべく、充電電圧Voscに予め定められた補正值ΔVが加算される(ステップS517の判断NO、ステップS518)。補正值ΔVだけ充電電圧Voscが増加されるため、パルスエネルギーPoscは上昇し、下限エネルギーEs0以上の状態に復帰する。

[0133] レーザ発振の継続によってレーザガスの劣化が進行すると、上述したような充電電圧Voscの制御だけでは、パルスエネルギーPoscを下限エネルギーEs0以上の状態に維持することができなくなる。そこで、補正值ΔVの加算によって補正された充電電圧Voscと上限充電電圧Vomaxとの比較判断がなされる(ステップS519)。上限充電電

圧 $V_{\text{omax}}$ とは、発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲(すなわち、充電器11の電圧設定範囲)内での最大充電電圧のことをいう。

- [0134] 補正值 $\Delta V$ の加算によって補正された充電電圧 $V_{\text{osc}}$ が上限充電電圧 $V_{\text{omax}}$ 未満の場合は、補正された充電電圧 $V_{\text{osc}}$ にて上述したステップS513以降の処理が行われる(ステップS519の判断YES)。一方、補正值 $\Delta V$ の加算によって補正された充電電圧 $V_{\text{osc}}$ が上限充電電圧 $V_{\text{omax}}$ 以上となった場合は、後述するガス制御処理によって発振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS519の判断NO、ステップS520)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS512以降の処理が行われる。
- [0135] ガス制御の処理フローは後述するが、この処理を行うことにより、レーザ光(シード光)のパルスエネルギー $P_{\text{osc}}$ は下限エネルギー $E_{s0}$ 以上の状態に復帰する。これにともなう、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{\text{osc}}$ の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。
- [0136] その後、更にレーザ発振が継続されると、このようなガス制御を行っても、レーザ光のパルスエネルギーを維持できなくなり、チャンバ内のレーザガス全てを交換することが必要となる。このようにチャンバにレーザガスを充填してから全交換するまでの期間をガスライフと言う。このようなレーザガスの全交換を繰り返すうちに、チャンバ内の電極の摩耗等により、レーザガスの全交換を行ってもレーザ光のパルスエネルギーが所望値に回復しなくなり、結果としてレーザの制御を行うことが不可能となる。この時点までをチャンバの寿命という。
- [0137] 発振用レーザ100の充電電圧 $V_{\text{osc}}$ の制御に加えて、上述したようなレーザガスの制御を行うことにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命)的にパルスエネルギー $P_{\text{osc}}$ の低下を抑制し、さらに、安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0138] ステップS512〜ステップS520の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_0$ が $M$ ( $=1000$ )を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目( $=1001$ パルス目)になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS514の判断NO)。

[0139] 図9はガス制御処理の処理フローを示す図である。

発振用レーザ100の場合はガス供給・排気ユニット14によって発振用チャンバ10内にレーザガスが追加供給され、増幅用レーザ300の場合はガス供給・排気ユニット34によって増幅用チャンバ30内にレーザガスが追加供給される(ステップS601)。レーザガスの追加量、圧力及び組成は予め設定されており、一回の追加によってパルスエネルギーが所定以上になるように設定されている。

[0140] なお、ここでは設定された量のレーザガスをチャンバ内に供給する例のみを示したが、これに限定されることない。例えば、F2ガス濃度が減少している場合は、F2ガスとバッファガスとの混合ガス、またはF2ガス、バッファガスとレアガスの混合ガスをチャンバ内に供給してもよい。さらに、チャンバ内にレーザガス、F2混合ガス等を供給した量だけ、レーザガスを排気してもよい。また、この例では、一気にレーザガスの供給・排気を行っているが、レーザガスの供給・排気路に、マスフローコントローラやオリフィスを使用して徐々に供給及び排気してもよい。

[0141] 次に、図8(b)、図10、図11を用いて増幅用レーザ300の制御について説明する。

図8(b)で示すように、増幅用レーザ300では、レーザ発振開始からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間はampスパイク制御処理が行われ(ステップS531)、N+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝1000パルス目〕までの間はamp毎パルス制御処理が行われる(ステップS532)。

[0142] 図10はampスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

レーザ発振開始前に以下の前処理が行われる。メインコントローラ4又はエネルギーコントローラ7ではバースト間のレーザ休止時間が図示しない休止時間カウンタTで計時されている(ステップS701)。露光装置3から発振指令が出力されると、休止時間の計時は停止される(ステップS702)。

[0143] 本レーザシステムには図示しないデータベースが設けられており、増幅用レーザ300の目標エネルギー $P_{atgt}$ 及び増幅用レーザ300の休止時間と、 $V_{tamp}$ - $P_{tamp}$ データテーブルとが対応付けられて記憶されている。 $V_{tamp}$ - $P_{tamp}$ データテーブルとは、ampスパイク制御処理における各パルス毎のデータ実績であり、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ のデータ $V_{tamp}$ と増幅後のレーザパルスエネルギー $P_{amp}$ のデータP

tampとで構成されている。休止時間カウンタTによって休止時間が特定され、この休止時間T及び目標エネルギーPatgtに対応するVtamp-Ptampデータテーブルが検索され、エネルギーコントローラ7に取り入れられる(ステップS703)。そして、休止時間カウンタTはリセットされる(ステップS704)。

- [0144] 上記前処理が終了すると、レーザ発振パルスカウンタkaに初期値1が設定され(ステップS705)、パルスカウンタkaが $N [= 3]$ を超えるまで、すなわち1〜3パルスの間は以下の処理が繰り返し行われる(ステップS706の判断YES)。
- [0145] Vtamp-Ptampデータテーブルのうちのkaパルス目のパルスエネルギーPtamp(ka)と目標エネルギーPatgtとの差 $\Delta Ptamp(ka) [= Ptamp(ka) - Patgt]$ が算出され、この算出結果 $\Delta Ptamp(ka)$ を用いて、kaパルス目の増幅用レーザ300の充電電圧の補正值 $\Delta Vtamp(ka) [= c \times \Delta Ptamp(ka)$ 、但しcは定数]が算出される。次に、Vtamp-Ptampデータテーブルのうちのkaパルス目の充電電圧Vtampと、補正值 $\Delta Vtamp(ka)$ とを用いて、実際のkaパルス目の充電電圧Vamp(ka) $[= Vtamp(ka) + \Delta Vtamp(ka)]$ が算出される(ステップS707)。
- [0146] そして、充電電圧Vamp(ka)にてkaパルス目のレーザ発振が行われ、そのパルスエネルギーPamp(ka)が測定される(ステップS708、ステップS709)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、先の休止時間及び目標エネルギーPatgtに対応するVtamp-Ptampデータテーブルのデータのうち、kaパルス目の充電電圧Vtamp(k)とパルスエネルギーPtamp(ka)が、算出された実際の充電電圧Vamp(ka)と測定されたパルスエネルギーPamp(ka)で更新され(ステップS710)、パルスカウンタkaに1がインクリメントされる(ステップS711)。
- [0147] ステップS706〜ステップS711の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタkaが $N [= 3]$ を超えた場合、すなわち $N + 1$ パルス目 $[= 4$ パルス目]になると、ampスパイク制御処理からamp毎パルス制御処理に移行する(ステップS706の判断NO)。
- [0148] 図11はamp毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。
- amp毎パルス制御処理で使用されるパルスカウンタkaは、ampスパイク制御処理で使用されたパルスカウンタkaと同一である。よって、ampスパイク制御でカウントされたパルス数はamp毎パルス制御処理に引き継がれる。



- [0149] 1パルス前の増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}(ka-1)$ と目標エネルギー $P_{tgt}$ との差 $\Delta P_{amp}(ka) [= P_{amp}(ka-1) - P_{tgt}]$ が算出され、この算出結果 $\Delta P_{amp}(ka)$ を用いて、 $ka$ パルス目の増幅用レーザ300の充電電圧の補正值 $\Delta V_{amp}(ka) [= a \times \Delta P_{amp}(ka)$ 、但し $a$ は定数]が算出される(ステップS801)。この補正值 $\Delta V_{amp}(ka)$ 及び1パルス前の充電電圧 $V_{amp}(ka-1)$ を用いて、 $ka$ パルス目の充電電圧 $V_{amp}(ka) [= \Delta V_{amp}(ka) + V_{amp}(ka-1)]$ が算出される(ステップS802)。そして、充電電圧 $V_{amp}(ka)$ にて $ka$ パルス目のレーザ発振が行われ(ステップS803)、増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}(ka)$ が測定される(ステップS804)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、パルスカウンタ $ka$ に1がインクリメントされる(ステップS805)。
- [0150] この段階で、パルスカウンタ $ka$ が $M [= 1000]$ を超えていない場合は、増幅用レーザ300の充電電圧のチェックが行われる(ステップS806の判断YES)。増幅用レーザ300の充電電圧、すなわち増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧の上限値 $V_{amax}$ は予め設定されており、最新の充電電圧 $V_{amp}(ka-1)$ が上限充電電圧 $V_{amax}$ 未満の場合は、再び上述したステップS801以降の処理が行われる(ステップS807の判断YES)。なお、増幅用レーザ300のレーザガスが劣化すると、レーザのパルスエネルギーが低下する。パルスエネルギーの低下を防ぐために、充電電圧 $V_{amp}$ は徐々に高くされる。最新の充電電圧 $V_{amp}(ka-1)$ が上限充電電圧 $V_{amax}$ 以上である場合は、増幅用チャンバ30内のレーザガスが制御される(ステップS807の判断NO、ステップS808)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS801以降の処理が行われる。
- [0151] 上述したガス制御処理を行うことにより、増幅用レーザ300のパルスエネルギーは回復し、これにともなって、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。
- [0152] 増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ の制御に加えて、上述したようなレーザガスの制御を行うことにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命)的にパルスエネルギー $P_{amp}$ の低下を抑制し、さらに、安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0153] ステップS801～ステップS808の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $ka$ が $M$

=1000]を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目[=1001パルス目]になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS806の判断NO)。

[0154] [1-2. 増幅用レーザ:スパイク制御、毎パルス制御及び露光量一定制御]

図12は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

図12に示す制御では、増幅用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N$ パルス目まではampスパイク制御処理が行われ、 $N+1$ パルス目から $M$ パルス目まではamp毎パルス制御処理が行われ、 $M+1$ パルス目から $O$ パルス目までは $S$ パルス分の積算エネルギーが一定となるように増幅用レーザ300による露光量一定制御処理(以下、amp露光量一定制御処理という)が行われる。なお、各処理の説明では、具体的なパルス数として $N=3$ 、 $M=39$ 、 $O=1000$ 、 $S=40$ という数値を用いている。

[0155] 上記[1-1]と同様に、発振用レーザ100と増幅用レーザ300は同期運転される。なお、発振用レーザの制御は[1-1]で説明した図8(a)の制御フローのように行われるため、その説明を省略する。但し、[1-1]では最終パルスを $M$ として説明しているが、[1-2]では最終パルスを $O$ として説明している。

[0156] 次に、図12(b)、図13を用いて増幅用レーザ300の制御について説明する。

図12(b)で示すように、増幅用レーザ300では、レーザ発振開始から $N$ パルス目[=3パルス目]までの間はampスパイク制御処理が行われ(ステップS931)、 $N+1$ パルス目[=4パルス目]から $M$ パルス目[=39パルス目]までの間はamp毎パルス制御処理が行われ(ステップS932)、 $M+1$ パルス目[=40パルス目]から $O$ パルス目[=1000パルス目]までの間は $S$ パルス分[=40パルス分]の露光量を一定にするamp露光量一定制御処理(ステップS933)が行われる。

[0157] ampスパイク制御処理(ステップS931)及びamp毎パルス制御処理(ステップS932)については上記[1-1]で既に説明したため、ここではamp露光量一定制御処理(ステップS933)を中心に説明する。

[0158] amp毎パルス制御処理において、パルスカウンタ $ka$ が $M$ [=39]を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目[=40パルス目]になると、amp毎パルス制御処理からamp露光量一定制御処理に移行する(ステップS806の判断NO)。

[0159] 図13はamp露光量一定制御処理の処理フローを示す図である。

本明細書では、Sパルス分〔＝40パルス分〕のパルスエネルギーを積算する際の積算開始パルス数をiで示し、積算終了パルス数をjで示す。

amp露光量一定制御処理を行う場合、第1回目の積算を行うために、図12(b)に示すステップS931のampスパイク制御処理及びステップS932のamp毎パルス制御処理と平行して以下の準備工程が行われる。

[0160] 準備工程では予め、積算開始パルス数iに1がストアされ、積算終了パルス数jにi+(S-1)〔＝40〕がストアされる(ステップS1001)。そして、kaパルス目のレーザ発振が行われる(ステップS1002)。なお、このステップS1002の処理は、パルスカウンタkaが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図10に示すampスパイク制御処理のステップS708の処理と同一である。また、パルスカウンタkaがN+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図11に示すamp毎パルス制御処理のステップS803の処理と同一である。

[0161] 次に、測定したパルスエネルギーPamp(ka)が記憶される。すなわち、パルスカウンタkaが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図10に示すampスパイク制御処理のステップS709で測定されたパルスエネルギーPamp(ka)が記憶される。また、パルスカウンタkaがN+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図11に示すamp毎パルス制御処理のステップS804で測定されたパルスエネルギーPamp(ka)が記憶される(ステップS1003)。

[0162] そして、パルスカウンタkaに1がインクリメントされる(ステップS1004)。なお、このステップS1004の処理は、パルスカウンタkaが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図10に示すampスパイク制御処理のステップS711の処理と同一である。また、パルスカウンタkaがN+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図11に示すamp毎パルス制御処理のステップS805の処理と同一である。以上のレーザ発振及びパルスエネルギーの測定はパルスカウンタkaがj-1になるまで繰り返される(ステップS1005の判断YES)。

[0163] パルスカウンタkaが積算終了パルス数jとなった場合、すなわち積算終了パルスの発振段階となった場合に、amp露光量一定制御処理の本工程に移行する(ステップS1005の判断NO)。

- [0164] 本工程では、iパルス目からj-1パルス目までの積算エネルギー、すなわちS-1パルス分の積算エネルギーD(i)の算出が行われる。iパルス目からS-1パルス分の積算エネルギーD(i)は下記(1)式にて算出される(ステップS1006)。

[数1]

$$D(i) = \sum_{n=i}^{j-1} P_{amp}(n) \quad (1)$$

- [0165] Sパルス分〔=40パルス分〕の目標積算エネルギーは予めD0と定められており、この目標積算エネルギーD0と上記(1)式にて算出したS-1パルス分〔=39パルス分〕の積算エネルギーD(i)との差P(ka)〔=D0-D(i)〕が算出される。算出したP(ka)は、Sパルス分の積算エネルギーをD0とするためのka〔=j〕パルス目における目標エネルギーである(ステップS1007)。
- [0166] 目標エネルギーP(ka)と1パルス前のパルスエネルギーPamp(ka-1)との差 $\Delta P(ka)$ 〔=P(ka)-Pamp(ka-1)〕が算出され、この算出結果 $\Delta P(ka)$ を用いて、kaパルス目すなわち積算終了パルスjの充電電圧の補正值 $\Delta V(ka)$ 〔=e $\times$  $\Delta P(ka)$ 、但しeは定数〕が算出される。この補正值 $\Delta V(ka)$ 及び1パルス前の充電電圧Vamp(ka-1)を用いて、kaパルス目の充電電圧Vamp(ka)〔= $\Delta V(ka)$ +Vamp(ka-1)〕が算出される(ステップS1008)。
- [0167] そして、充電電圧Vamp(ka)にてkaパルス目のレーザ発振が行われる(ステップS1009)。レーザ発振に伴いパルスエネルギーPamp(ka)が測定され、その測定結果が記憶される(ステップS1010)。
- [0168] 露光装置3側で、露光量安定性の検定を行う場合には、ステップS1006で算出したS-1パルス分〔=39パルス分〕の積算エネルギーD(i)及びパルスエネルギーPamp(ka)を用いて、Sパルス分〔=40パルス分〕の積算エネルギーD(ka)〔=D(i)+Pamp(ka)〕が算出され、算出データが露光装置3に送信される(ステップS1011)。露光装置3は、例えば、検定の結果算出データが露光量安定性の仕様範囲外であった場合、露光を中止する。なお、露光装置3側で露光量安定性の検定を行わない場合は、ステップS1011を省略してもよい。

- [0169] この段階で、パルスカウンタkaがO [=1000]未満の場合は、パルスカウンタkaに1がインクリメントされる(ステップS1012の判断YES、ステップS1013)。最新の増幅用レーザ300の充電電圧Vamp (ka-1)が上限充電電圧Vamax未満の場合は、積算開始パルス数iに1がインクリメントされ、積算終了パルス数jに1がインクリメントされ、更に上述したステップS1006以降の処理が行われる(ステップS1014の判断YES、ステップS1016)。一方、最新の充電電圧Vamp (ka-1)が上限充電電圧Vamax以上である場合は、増幅用チャンバ30内のレーザガスが制御された後、積算開始パルス数iに1がインクリメントされ、積算終了パルス数jに1がインクリメントされ、更に上述したステップS1006以降の処理が行われる(ステップS1014の判断NO、ステップS1015、ステップS1016)。
- [0170] ステップS1006ーステップS1016の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタkaがO [=1000]になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS1012の判断NO)。
- [0171] ここまで説明してきた第1の制御例によれば、2ステージレーザのパルスエネルギー制御を高精度に行うことができる。したがって、2ステージレーザのパルスエネルギーを安定させることができる。
- [0172] 第1の制御例は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーが約Es0以上の増幅飽和領域(図6の領域2)である場合、シード光のパルスエネルギーが変動しても、増幅後のパルスエネルギーはほぼ一定であるという特性を利用したものである。よって、増幅後のパルスエネルギーは、増幅用レーザの充電電圧、すなわち増幅用高電圧パルス発生器32の主コンデンサC0の充電電圧によって決定される。
- [0173] 第1の制御例において、発振用レーザ100の制御は、単にシード光のパルスエネルギーを上述したEs0以上にするという簡便な制御(例えば、発振用レーザの充電電圧を一定にする)でよく、高精度なパルスエネルギー制御は必要ない。実質的に増幅用レーザ300の制御が厳密に行われるのみである。増幅後のパルスエネルギーPampを測定し、この測定結果に基づいて、増幅用レーザ300の充電電圧Vampをパルス毎に制御(ampスパイク制御処理、amp毎パルス制御処理、amp露光量一定制御

処理等)することにより増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー制御が実現できる。

[0174] このように、第1の制御例は、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の制御分担を明確に分けて制御することができるため、制御の安定性がよく、誤差が生じ難い。したがって、制御の精度を向上させることができるといえる。

[0175] また、本制御例のように一方が簡便で他方が厳密である制御は容易な制御であるため、コントローラの演算負荷が小さい。したがって、高性能のコントローラを必要としないため、コストを低減できる。

[0176] また、発振用レーザ、増幅用レーザのガス圧、ガス組成を変化させる制御を併用することにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命期間)の出力低下を補うパルスエネルギー制御が可能となり、長期にわたって安定したパルスエネルギー制御が可能となる。

[0177] [1-3. 1-1、1-2の変形例]

上述した[1-1]、[1-2]の制御例では、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のエネルギーが約 $E_{s0}$ 以上の増幅飽和領域(図6の領域2)となるように、発振用レーザ100の充電電圧が一定になるように制御される。[1-1]、[1-2]の制御例によれば、発振用レーザ100から出力されるシード光の出力変動(パルスエネルギーの変動)が増幅用レーザ300から出力されるレーザ光のパルスエネルギーに及ぼす影響が小さくなり、2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御が良好になった。

[0178] 本変形例では、発振用レーザ100から出力されるシード光のパルスエネルギーが増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以上になるという条件を維持しながら、さらに、発振用レーザ100の充電電圧(すなわち、充電器11の設定電圧)と増幅用レーザ300の充電電圧(すなわち、充電器31の設定電圧)との関係を以下のようにする。

(1) 発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる。

(2) 両充電電圧の電圧変化割合または電圧変化量を略一致させる。

[0179] このように、両充電電圧の関係を設定することにより、シード光の出力変動がレーザ

光のパルスエネルギーに及ぼす影響が小さくなり、2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御が良好になるという効果に加えて、後述するように、発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期変動に起因する2ステージレーザのパルスエネルギーの変動幅を小さくすることが可能となる。

[0180] 以下、両充電電圧の関係を上記した(1)、(2)のようにすることにより、パルスエネルギーの変動幅を小さくすることができる理由を説明する。

[0181] (1)両充電電圧が略一致する場合

図4、図5を参照して説明したように、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングと、増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWがオン状態となるタイミングがそれぞれ一定であったとしても、発振用レーザ100における充電電圧 $V_{osc}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧 $V_{amp}$ の値に応じて、各々のレーザで放電が発生するタイミングは変動する。これは高電圧パルス発生器12、32に設けられた磁気パルス圧縮回路に含まれる磁気スイッチの $V_t$ 積特性の相違によるものである。

[0182] このため、同期コントローラ8はエネルギーコントローラ7から次回放電の充電電圧(電圧 $V_{osc}$ 、 $V_{amp}$ )を指示する信号を受け取り、この指示内容から前記 $V_t$ 積特性を考慮して遅延時間を決定する。例えば、図4に示した特性カーブA、Bを利用して、充電電圧設定値に対して各レーザについて補正を行い、固体スイッチSWのスイッチングから放電発生までの時間が一定になるよう制御する。

[0183] 図4に示すように、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300における充電電圧設定範囲は同範囲 $V_{c1}$ 〜 $V_{c2}$  ( $V_{c1} < V_{c2}$ ) であるとする。発振用レーザ100における充電電圧 $V_{osc}$ が $V_{c2}$ であり、増幅用レーザ300における充電電圧 $V_{amp}$ が $V_{c1}$ である場合、各レーザ100、300の各固体スイッチSWがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれ、すなわち同期ずれは最大値 $T1$ となる。この際、例えば、同期コントローラ8が、各固体スイッチSWのスイッチングから放電発生までの時間が一定になるように遅延時間を補正すれば、上記 $T1$ を0にすることは可能である。

[0184] しかしながら、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の動作条件(繰り返し周波

数、動作時間、稼動デューティ、休止時間など)で各高電圧パルス発生器12、32が有する磁気パルス圧縮回路の構成素子(コンデンサ、磁気スイッチなど)の温度が変化すると、図14で示すように、特性カーブA、B(実線)は特性カーブA'、B'(破線)のようにそれぞれ変化する。

- [0185] そのため、特性カーブA、Bを考慮して、同期コントローラ8が上記T1を0にするように補正を行ったとしても、実際の特性カーブがA'、B'であると、ずれはTr1であるため、図14から明らかなように、実際にはT1-Tr1の同期ずれが発生することになる。一般的に充電電圧が低いほど、温度による時間変化の絶対値が大きい。両レーザを充電電圧設定範囲Vc1〜Vc2内の任意の充電電圧で使用する場合は、T1-Tr1が最大同期ずれとなる。
- [0186] ここで、発振用レーザ100における充電電圧Voscと増幅用レーザ300における充電電圧Vampとを略一致させる。すなわち、図14に示すように、充電電圧設定範囲Vc1〜Vc2内の任意の同充電電圧Veで発振用レーザ100および増幅用レーザ300を使用する。上記したように、同期ずれT1-Tr1は最大であるので、発振用レーザ100および増幅用レーザ300を同充電電圧Veで使用した際に発生しうる同期ずれTe-Treは、常にT1-Tr1以下となる。そのため、発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期精度が高くなる。
- [0187] 発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させることにより、シード光の出力変動がレーザ光のパルスエネルギーに及ぼす影響が小さくなり、2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御が良好になるという効果に加えて、発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期変動に起因する2ステージレーザのパルスエネルギーの変動幅を小さくすることが可能となる。
- [0188] (2) 両充電電圧の電圧変化割合または電圧変化量が略一致する場合

図5に示すように、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300における充電電圧設定範囲が相違し、発振用レーザ100における充電電圧設定範囲がVco1〜Vco2( $V_{co1} < V_{co2}$ )であり、増幅用レーザ300における充電電圧設定範囲が、Vca1〜Vca2( $V_{ca1} < V_{ca2}$ )であり、且つ、 $V_{ca1} < V_{co2} < V_{ca2}$ であるとする。発振用レーザ100



における充電電圧 $V_{osc}$ が $V_{co2}$ 、増幅用レーザ300における充電電圧 $V_{amp}$ が $V_{ca1}$ である場合、各レーザ100、300の各固体スイッチがオン状態になってから各電極間で放電発生するまでの時間のずれ、すなわち同期ずれの最大値は $T1$ となる。上述と同様、例えば、同期コントローラ8が、各固体スイッチSWのスイッチングから放電発生までの時間が一定になるように遅延時間を補正すれば、上記 $T1$ を0にすることは可能である。

- [0189] しかしながら、上述したように、発振用レーザ100及び増幅用レーザ300の動作条件で各高電圧パルス発生器12、32が有する磁気パルス圧縮回路の構成素子の温度が変化すると、図15で示すように、特性カーブC、Dは特性カーブ $C'$ 、 $D'$ のようにそれぞれ変化する。
- [0190] そのため、特性カーブC、Dを考慮して、同期コントローラ8が上記 $T1$ を0にするように補正を行ったとしても、実際の特性カーブが $C'$ 、 $D'$ であると、ずれは $Tr1$ であるため、図15から明らかなように、実際には $T1-Tr1$ の同期ずれが発生することになる。一般的に充電電圧が低いほど、温度による時間変化の絶対値は大きい。図Aのときと同様、 $T1-Tr1$ は最大同期ずれとなる。
- [0191] 図15に示す例のように、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の充電電圧設定領域が異なる場合には、充電電圧を一致させるのは困難なため、充電電圧の変化割合を一致させる。
- [0192] 具体的には、発振用レーザ100、増幅用レーザ300ともに最大充電電圧設定値( $V_{co2}$ 、 $V_{ca2}$ )を100%とし、これに対する両レーザの充電電圧値の割合(%)を略一致させる。すなわち、図15に示すように、発振用レーザ100を、充電電圧設定範囲 $V_{co1}-V_{co2}$ 内の充電電圧 $V_{coe}$ で使用し、増幅用レーザ300を、充電電圧設定範囲 $V_{ca1}-V_{ca2}$ 内の充電電圧 $V_{cae}$ で使用する。ここで、 $V_{coe}/V_{co2} \times 100(\%) = V_{cae}/V_{ca2} \times 100(\%)$ とする。
- [0193] 上記したように、同期ずれ $T1-Tr1$ は最大であるので、発振用レーザ100および増幅用レーザ300を同変化割合(すなわち、発振用レーザ100の充電電圧を $V_{oe}$ 、増幅用レーザ300の充電電圧を $V_{ae}$ )で使用した際に発生しうる同期ずれ $Te-Tre$ は、常に $T1-Tr1$ 以下となる。そのため、発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期

精度が高くなる。

- [0194] なお、図5に示したような特性の場合、 $V_{ca2}-V_{ca1}$ と $V_{co2}-V_{co1}$ が同程度であるため(すなわち、充電電圧設定範囲の幅が同程度であるため)、変化量を一定にする制御を行ってもよい。
- [0195] 発振用レーザ100における充電電圧と増幅用レーザ300における充電電圧の変化割合、あるいは、変化量を略一致させることにより、シード光の出力変動がレーザ光のパルスエネルギーに及ぼす影響が小さくなり、2ステージレーザから出力されるレーザ光のパルスエネルギー制御が良好になるという効果に加えて、発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期変動に起因する2ステージレーザのパルスエネルギーの変動幅を小さくすることが可能となる。
- [0196] 以下、発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる場合の制御([1-3-1])と、両充電電圧の電圧変化割合もしくは充電電圧の電圧変化量をほぼ同じとする場合の制御([1-3-2])について説明する。
- [0197] [1-3-1. 発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる場合の制御]
- 以下で、発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる場合の制御について説明する。
- [0198] 本制御例は、先に[1-1]、[1-2]で説明した制御例の変形例であり、増幅用レーザ300の制御は同じである。すなわち、増幅用レーザ300は、制御例[1-1]と同様、1バーストのうち1パルス目からNパルス目まではampスパイク制御処理が行われ、N+1パルス目からMパルス目まではamp毎パルス制御処理が行われる。あるいは、増幅用レーザ300は、制御例[1-2]と同様、1バーストのうち1パルス目からNパルス目まではampスパイク制御処理が行われ、N+1パルス目からMパルス目まではamp毎パルス制御処理が行われ、M+1パルス目からOパルス目まではSパルス分の積算エネルギーが一定となるようにamp露光量一定制御処理が行われる。増幅用レーザ300の制御は上述の通りであるので説明を省略し、以下、発振用レーザ100の制御例について、図16を用いて説明する。

[0199] 図16は発振用レーザの制御フローを示す図である。

図16で示すように、発振用レーザ100では、最初にパルスカウンタkoにゼロが設定される(ステップS2511)。次に、パルスカウンタkoに1がインクリメントされる(ステップS2512)。

[0200] エネルギーコントローラ7は、増幅用レーザ300の充電電圧Vampとして設定した電圧と同じ電圧を発振用レーザ100の充電電圧Voscに設定する。すなわち、増幅用レーザ300で行われている処理がampスパイク制御処理段階であれば、図10に示す制御処理フローのステップS707で設定した充電電圧Vamp(ka)が充電電圧Vosc(ko)に設定される。また、増幅用レーザ300で行われている処理がamp毎パルス制御処理段階であれば、図11に示す制御処理フローのステップS802で設定した充電電圧Vamp(ka)が充電電圧Vosc(ko)に設定される。さらに、増幅用レーザ300で行われている処理がamp露光量一定制御処理段階であれば、図13に示す制御処理フローのステップS1008で設定した充電電圧Vamp(ka)が充電電圧Vosc(ko)に設定される。ここで、ko=kaである(ステップS2513)。

[0201] ここでパルスカウンタkoが $M+1$ 〔=1001〕未満であれば、ステップS2513で設定された充電電圧Voscにてレーザ発振が行われる(ステップS2514の判断YES、ステップS2515)。第1モニタモジュール19ではパルスエネルギーPosc(ko)が測定され、このパルスエネルギーPosc(ko)を示す信号がエネルギーコントローラ7に出力される(ステップS2516)。

[0202] パルスエネルギーPosc(ko)が増幅飽和領域の下限エネルギーEs0以上である場合は、上述したステップS2512以降の処理が行われる。つまり、前パルスの時と同様に、その都度、増幅用レーザ300で設定された充電電圧Vampと同じ値に設定された充電電圧Voscにてレーザ発振は継続される(ステップS2517の判断YES)。

[0203] しかし、レーザ発振の継続に伴いレーザガスは劣化していき、増幅用レーザ300で設定された充電電圧Vampと同じ値に設定された充電電圧VoscのときのパルスエネルギーPosc(ko)が、下限エネルギーEs0を下回る場合がある。

[0204] 制御例〔1-1〕〔1-2〕のときは、パルスエネルギーPoscを下限エネルギーEs0以上にすべく、充電電圧Voscに予め定められた補正值 $\Delta V$ を加算し、補正值 $\Delta V$ だけ充

電圧 $V_{osc}$ を増加させていた。しかしながら、本制御例では、充電電圧 $V_{osc}(k_0)$ は増幅用レーザ300で設定された充電電圧 $V_{amp}(k_a)$ と同じ値に設定されるので、充電電圧の補正值 $\Delta V$ を加算することはできない。

- [0205] そこで、上述した図9に示すガス制御処理によって発振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS2517の判断NO、ステップS2518)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS512以降の処理が行われる。ガス制御を行うことにより、レーザ光(シード光)のパルスエネルギー $P_{osc}$ は回復し、下限エネルギー $E_{s0}$ 以上の状態に復帰する。
- [0206] 上述したようなレーザガスの制御を行うことにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命)的にパルスエネルギー $P_{osc}$ の低下を抑制し、さらに、安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0207] ステップS2512〜ステップS2518の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_0$ が $M$ 〔=1000〕を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目〔=1001パルス目〕になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS2514の判断NO)。
- [0208] 本制御は、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ を主体とした制御である。そのため、増幅用レーザ300のガス制御処理(例えば、amp毎パルス制御処理におけるステップS808やamp露光量一定制御処理におけるステップS1015)より、先に発振用レーザ100のガス制御処理が行われると、増幅用レーザ300の動作が中断してしまう。よって、増幅用レーザ300におけるガス制御処理より後に発振用レーザ100のガス制御が行われる方は望ましい。
- [0209] 一般に、レーザ光のパルスエネルギーは、チャンバ内に充填されるレーザガスの圧力が高いほど大きくなる傾向にある。そこで、例えば、発振用レーザ100の発振用チャンバ10内のレーザガス圧力を高めに設定しておき、充電電圧 $V_{osc}(k_0)$ (すなわち、増幅用レーザ300の初期充電電圧 $V_{amp}(k_a)$ )の値が低いときでも、発振用レーザ100のレーザ光の出力が上述した下限エネルギー $E_{s0}$ と比較して十分大きいようにしておく。
- [0210] すると、発振用チャンバ10内のレーザガスが劣化してパルスエネルギー $P_{osc}$ が低

下しても、このパルスエネルギー $P_{osc}$ が上述した下限エネルギー $E_{s0}$ を下回るまでのパルス数を大きくすることができる。このように調整すれば、発振用レーザ100が増幅用レーザ300より先にガス制御処理フローに入ることを防止できる。

- [0211] なお、増幅用レーザ300で行われる処理がガス制御処理に移行した場合(すなわち、amp毎パルス制御処理におけるステップS808やamp露光量一定制御処理におけるステップS1015に移行した場合)には、例え発振用レーザ100から出力されるシード光のパルスエネルギーが上述した下限エネルギー $E_{s0}$ より大きかったとしても、増幅用レーザ300の運転に連動して発振用レーザ100の運転もガス制御処理(ステップS2517)に移行させる方が望ましい。
- [0212] 先に述べたように、レーザガスの圧力が高くなると、同期コントローラ8からのトリガ信号によって、発振用高電圧パルス発生器12、増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチ(半導体スイッチ)SWがオン状態になってから、電極10a、10b間、電極30a、30b間に放電が発生するまでの時間が長くなる。
- [0213] レーザガス制御においてレーザガスがチャンバ内に追加供給される場合、増幅用レーザ300で行われる処理が発振用レーザ100で行われる処理より先にガス制御処理に移行すると、増幅用チャンバ30内のレーザガス圧力が先に増加する。電極間距離、レーザガス充填時のレーザガス圧力にもよるが、一方のチャンバ内のレーザガス圧力の変化により、両レーザが放電するタイミングが変化する。本制御例の場合、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の充電電圧が略同一であるので、レーザガス圧力の変化は、放電タイミングの変化に大きな影響を及ぼす。
- [0214] こういった放電タイミングの変化は、先述の通り、放電検出器20、40により検出される発振用チャンバ10、増幅用チャンバ30における放電の発生タイミング情報に基づきフィードバック補正される。しかし、こういったタイミング補正は、両レーザの放電タイミングの差が小さい方が高精度となる傾向にある。
- [0215] そのため、増幅用レーザ300側のガス制御処理への移行タイミングと、発振用レーザ100側のガス制御処理への移行タイミングとを連動させると、発振用チャンバ10と増幅用チャンバ30の双方のレーザガス圧力が増加する。結果として、ガス制御処理への移行タイミングが連動しない場合と比較して、両レーザの放電タイミングの差を小

さくすることが可能となる。よって、フードバック補正の精度をより高精度にすることができる。

[0216] [1-3-2. 両充電電圧の電圧変化割合または電圧変化量を略一致させる制御]

以下で、(A)発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化割合と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化割合とを略一致させる制御例、及び(B)発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化量と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化量とを略一致させる制御例について説明する。

[0217] 本制御例も、先に[1-1]、[1-2]で説明した制御例の変形例であり、増幅用レーザ300の制御は同じである。すなわち、増幅用レーザ300は、制御例[1-1]と同様、1バーストのうち1パルス目からNパルス目まではampスパイク制御処理が行われ、N+1パルス目からMパルス目まではamp毎パルス制御処理が行われる。あるいは、増幅用レーザ300は、制御例[1-2]と同様、1バーストのうち1パルス目からNパルス目まではampスパイク制御処理が行われ、N+1パルス目からMパルス目まではamp毎パルス制御処理が行われ、M+1パルス目からOパルス目まではSパルス分の積算エネルギーが一定となるようにamp露光量一定制御処理が行われる。

[0218] (A)発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化割合と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化割合とを略一致させる制御

図17は発振用レーザの制御フローを示す図である。

本制御は、[1-3-1]で説明した制御、つまり発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる場合の発振用レーザ100の制御とほぼ同じであるため、ここでは同一処理の説明は省略し、相違点のみを説明する。相違点は、図17に示すステップS2513'のみである。

[0219] ステップS2513'において、エネルギーコントローラ7は、発振用レーザ100、増幅用レーザ300ともに最大充電電圧設定値( $V_{co2}$ 、 $V_{ca2}$ )を100%とし、これに対する両レーザの充電電圧値の割合(%)を略一致させる。

[0220] 発振用レーザ100を充電電圧設定範囲 $V_{co1}$ 〜 $V_{co2}$ 内の充電電圧 $V_{coe}$ で使用し、増幅用レーザ300を充電電圧設定範囲 $V_{ca1}$ 〜 $V_{ca2}$ 内の充電電圧 $V_{coe}$ で使用する場合、 $V_{coe}/V_{co2} \times 100(\%) = V_{cae}/V_{ca2} \times 100(\%)$ となるようにする。

- [0221] すなわち、増幅用レーザ300で行われている処理がampスパイク制御処理段階であれば、図10に示す制御処理フローのステップS707で設定した充電電圧 $V_{amp}(k_a)$ を用いて、充電電圧 $V_{osc}(k_o)$ は、 $V_{osc}(k_o) = V_{amp}(k_a) \times V_{co2} / V_{ca2}$ となるように設定される。また、増幅用レーザ300で行われている処理がamp毎パルス制御処理段階であれば、図11に示す制御処理フローのステップS802で設定した充電電圧 $V_{amp}(k_a)$ を用いて、充電電圧 $V_{osc}(k_o) = V_{amp}(k_a) \times V_{co2} / V_{ca2}$ となるように設定される。さらに、増幅用レーザ300で行われている処理がamp露光量一定制御処理段階であれば、図13に示す制御処理フローのステップS1008で設定した充電電圧 $V_{amp}(k_a)$ を用いて、充電電圧 $V_{osc}(k_o)$ は、 $V_{osc}(k_o) = V_{amp}(k_a) \times V_{co2} / V_{ca2}$ となるように設定される(ステップS2513')。
- [0222] 他の制御ステップは、図16に示したものと同一であるので、ここでは説明を省略する。
- [0223] (B) 発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化量と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化量とを略一致させる制御
- 上述したように、図5に示したような特性の場合、 $V_{ca2} - V_{ca1}$ と $V_{co2} - V_{co1}$ が同程度であるため(すなわち、充電電圧設定範囲の幅が同程度であるため)、上記(A)の制御の代わりに、変化量を一定にする制御を行ってもよい。
- [0224] 増幅用レーザ300の制御は、上述した[1-1]、[1-2]で説明した制御例と同じであるため説明を省略し、以下、発振用レーザ100の制御例について、図18を用いて説明する。
- [0225] 図18は発振用レーザの制御フローを示す図である。
- 図18で示すように、発振用レーザ100では、最初にレーザ発振パルスカウンタ $k_o$ にゼロが設定される(ステップS3511)。エネルギーコントローラ7では発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ に予め定められた初期値が設定される(ステップS3512)。初期値は、例えば、 $(V_{co1} + V_{co2}) / 2$ とする。その後、パルスカウンタ $k_o$ に1がインクリメントされる(ステップS3513)。
- [0226] エネルギーコントローラ7は、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ の補正值 $\Delta V_{amp}$ (すなわち、充電電圧 $V_{amp}$ の変化量)と同じ補正量だけ、発振用レーザ100の充電

電圧 $V_{osc}$ を補正する(充電電圧 $V_{osc}$ の変化量を充電電圧 $V_{amp}$ の変化量と一致させる)。すなわち、1パルス前の充電電圧 $V_{osc}(k_o-1)$ が $\Delta V_{amp}(k_o)$ によって補正され、 $V_{osc}(k_o) = V_{osc}(k_o-1) + \Delta V_{amp}(k_o)$ とされる。増幅用レーザ300で行われている処理がampスパイク制御処理段階であれば、図10に示す制御処理フローのステップS707で算出した増幅用レーザ300の充電電圧の補正值 $\Delta V_{tamp}(k_a)$ が $\Delta V_{amp}(k_o)$ とされる。また、増幅用レーザ300で行われている処理がamp毎パルス制御処理段階であれば、図11に示す制御処理フローのステップS801で算出した増幅用レーザ300の充電電圧の補正值 $\Delta V_{amp}(k_a)$ が $\Delta V_{amp}(k_o)$ とされる。さらに、増幅用レーザ300で行われている処理がamp露光量一定制御処理段階であれば、図13に示す制御処理フローのステップS1008で算出した増幅用レーザ300の充電電圧の補正值 $\Delta V(k_a)$ が $\Delta V_{amp}(k_o)$ とされる。ここで、 $k_o = k_a$ である。(ステップS3514)

。

- [0227] ここでパルスカウンタ $k_o$ が $M+1 [=1001]$ 未満であれば、設定された充電電圧 $V_{osc}$ にてレーザ発振が行われる(ステップS3515の判断YES、ステップS3516)。第1モニタモジュール19ではパルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ が測定され、このパルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ を示す信号がエネルギーコントローラ7に出力される(ステップS3517)。
- [0228] そして、パルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ と増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ との比較判断、ならびに、変化量 $\Delta V_{amp}$ の加算によって補正された充電電圧 $V_{osc}$ と上限充電電圧 $V_{omax}$ との比較判断がなされる(ステップS3518)。
- [0229] パルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ が増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以上であり、且つ、充電電圧 $V_{osc}$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ 未満の場合は、上述したステップS3513以降の処理が行われ、ステップS3514で設定される充電電圧 $V_{osc}$ にてレーザ発振は継続される(ステップS3518の判断YES)。
- [0230] パルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ が増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ を下回ったり、もしくは、充電電圧 $V_{osc}$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ 以上の場合は、発振用チャンバ10内のレーザガスが劣化したと判断し、ガス制御処理によって発振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS3518の判断NO、ステップS3519)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS3512以降の処理が行われる。



- [0231] ガス制御処理を行うことにより、レーザ光(シード光)のパルスエネルギー $P_{osc}$ は回復し、下限エネルギー $E_{s0}$ 以上の状態に復帰する。これにともなう、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。
- [0232] 発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ の制御に加えて、上述したようなレーザガスの制御を行うことにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命)的にパルスエネルギー $P_{osc}$ の低下を抑制し、さらに、安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0233] ステップS3512〜ステップS3519の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_o$ が $M$ 〔=1000〕を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目〔=1001パルス目〕になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS3515の判断NO)。
- [0234] 発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化割合と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化割合とを略一致させる制御、もしくは、発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化量と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化量とを略一致させる制御においても、上述した発振用レーザ100における充電電圧の値と増幅用レーザ300における充電電圧の値とを略一致させる場合の制御のときと同様、増幅用レーザ300におけるガス制御処理より後に発振用レーザ100のガス制御処理が行われる方が望ましい。
- [0235] また、増幅用レーザ300がガス制御処理に移行した場合(すなわち、amp毎パルス制御処理におけるステップS808やamp露光量一定制御処理におけるステップS1015に移行した場合)、発振用レーザ100も、例え発振用レーザ100から出力されるシード光のパルスエネルギーが上述した下限エネルギー $E_{s0}$ より大きかったとしても、増幅用レーザ300の運転に連動して発振用レーザ100の運転もガス制御処理(ステップS2518もしくはステップS3519)に移行させる方が望ましい。
- [0236] [2. 第2の制御例]
- 図19は第2の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。図19に示す個々の矩形波等は1バーストの充電電圧、パルスエネルギーを示す。
- 第2の制御例は、目標とするパルスエネルギーに応じて、発振用レーザ100の充電

電圧を変化させると共に、増幅用レーザ300の充電電圧を一定にするものである。

- [0237] 第2の制御例の概要を説明する。発振用レーザ100のパルスエネルギー $P_{osc}$  (即ち、増幅用レーザ300に注入されるシード光のパルスエネルギー)が増幅用レーザ300の増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域で運転される。この動作領域では、発振用レーザ100から出力されるシード光のパルスエネルギーの変化に応じて増幅後のパルスエネルギーが変化する(図6参照)。
- [0238] そこで、原則として、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ は一定制御される(パルス毎に制御されない:図19(c)参照)。但し、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ を超えた場合又は増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ が目標エネルギー $P_{atgt}$ でない場合に増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ は増加される。
- [0239] 増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー $P_{atgt}$ となるように(図19(d))、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ がパルス毎に制御される(図19(a)参照)。
- [0240] 以下では、2通りの運転方法([2-1]、[2-2])を例にあげて、第2の制御例を説明する。なお、ここではMOPO方式の2ステージレーザの場合について説明するが、MOPA方式の2ステージレーザの場合も、同様の制御となる。
- [0241] [2-1. 発振用レーザ:スパイク制御及び毎パルス制御]
- 図20は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。
- 図20に示す制御では、発振用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目からNパルス目までは発振用レーザ100によるスパイク制御処理(以下、oscスパイク制御処理という)が行われ、N+1パルス目からMパルス目までは発振用レーザ100による毎パルス制御処理(以下、osc毎パルス制御処理という)が行われる。なお、各処理の説明では、具体的なパルス数として $N=3$ 、 $M=1000$ という数値を用いている。
- [0242] 発振用レーザ100と増幅用レーザ300は同期運転されており、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の発振タイミングは同期コントローラ8によって制御されている。具体的には、発振用チャンバ10の電極10a、10b間で放電することによって出力されるシード光が、増幅用レーザ300の増幅用チャンバ30内に注入され、電極30a、30b

間の放電領域(励起領域)に満たされた時に、電極30a、30b間で放電すれば最も効率的にシード光が増幅される。シード光の増幅を効率的に行うために、同期コントローラ8は、発振用高電圧パルス発生器12の固体スイッチSWに出力するトリガ信号と増幅用高電圧パルス発生器32の固体スイッチSWに出力するトリガ信号との間に遅延時間を設ける。

[0243] まず、図20(a)、図21、図22を用いて発振用レーザ100の制御について説明する。

[0244] 図20(a)で示すように、発振用レーザ100では、レーザ発振開始からNパルス目〔=3パルス目〕までの間はoscスパイク制御処理が行われ(ステップS1211)、N+1パルス目〔=4パルス目〕からMパルス目〔=1000パルス目〕までの間はosc毎パルス制御処理が行われる(ステップS1212)。

[0245] 図21はoscスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

oscスパイク制御処理では、レーザ発振開始前に以下の前処理が行われる。メインコントローラ4又はエネルギーコントローラ7ではバースト間のレーザ休止時間が図示しない休止時間カウンタTで計時されている(ステップS1301)。露光装置3から発振指令が出力されると、休止時間の計時は停止される(ステップS1302)。

[0246] 本制御例においては、発振用レーザ100は、増幅後のレーザ光のパルスエネルギーPampが目標値Patgtとなるように制御される。したがって、増幅後のレーザ光のパルスエネルギーPampの測定値に基づいて、増幅後のレーザ光のパルスエネルギーが増幅用レーザ300の目標エネルギーPatgtとなるように発振用レーザ100の制御が行われる。

[0247] 本レーザシステムには図示しないデータベースが設けられており、増幅用レーザ300の目標エネルギーPatgt及び発振用レーザ100の休止時間と、Vtosc-Ptampデータテーブルとが対応付けられて記憶されている。Vtosc-Ptampデータテーブルとは、oscスパイク制御処理における各パルス毎のデータ実績であり、発振用レーザ100の充電電圧VoscのデータVtoscと増幅後のレーザパルスエネルギーPampのデータPtampとで構成されている。休止時間カウンタTによって発振用レーザ100の休止時間が特定され、この休止時間T及び目標エネルギーPatgtに対応するVtosc-Ptampデ

ータテーブルが検索され、エネルギーコントローラ7に取り入れられる(ステップS1303)。そして、休止時間カウンタTはリセットされる(ステップS1304)。

[0248] 上記前処理が終了すると、レーザ発振パルスカウンタkoに初期値1が設定され(ステップS1305)、パルスカウンタkoが $N [= 3]$ を超えるまで、すなわち1〜3パルスの間は以下の処理が繰り返し行われる(ステップS1306の判断YES)。

[0249] Vtosc-Ptampデータテーブルのうちのkoパルス目のパルスエネルギーPtamp(ko)と目標エネルギーPatgtとの差 $\Delta Ptamp(ko) [= Ptamp(ko) - Patgt]$ が算出され、この算出結果 $\Delta Ptamp(ko)$ を用いて、koパルス目の発振用レーザ100の充電電圧の補正值 $\Delta Vtosc(ko) [= d \times \Delta Ptamp(ko)$ 、但しdは定数]が算出される。次に、Vtosc-Ptampデータテーブルのうちのkoパルス目の充電電圧Vtoscと、補正值 $\Delta Vtosc(ko)$ と、を用いて、実際のkoパルス目の充電電圧Vosc(ko)  $[= Vtosc(ko) + \Delta Vtosc(ko)]$ が算出される(ステップS1307)。

[0250] そして、充電電圧Vosc(ko)にてkoパルス目のレーザ発振が行われ、増幅後のパルスエネルギーPamp(ko)が測定される(ステップS1308、ステップS1309)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、先の休止時間及び目標エネルギーPatgtに対応するVtosc-Ptampデータテーブルのデータのうち、koパルス目の充電電圧Vtosc(ko)とパルスエネルギーPtamp(ko)が、算出された実際の充電電圧Vosc(ko)と測定されたパルスエネルギーPamp(ko)で更新され(ステップS1310)、パルスカウンタkoに1がインクリメントされる(ステップS1311)。

[0251] ステップS1306〜ステップS1311の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタkoが $N [= 3]$ を超えた場合、すなわち $N + 1$ パルス目 $[= 4$ パルス目]になると、oscスパイク制御処理からosc毎パルス制御処理に移行する(ステップS1306の判断NO)。

[0252] 図22はosc毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。

osc毎パルス制御処理で使用されるパルスカウンタkoは、oscスパイク制御処理で使用されたパルスカウンタkoと同一である。よって、oscスパイク制御でカウントされたパルス数はosc毎パルス制御処理に引き継がれる。

[0253] 1パルス前の増幅後のパルスエネルギーPamp(ko-1)と目標エネルギーPatgtとの差 $\Delta Pamp(ko) [= Pamp(ko-1) - Patgt]$ が算出され、この算出結果 $\Delta Pamp(ko)$ を

用いて、 $k_0$ パルス目の発振用レーザ100の充電電圧の補正值  $\Delta V_{osc}(k_0)$  [ $=b \times \Delta P_{amp}(k_0)$ 、但し $b$ は定数]が算出される(ステップS1401)。この補正值  $\Delta V_{osc}(k_0)$  及び1パルス前の充電電圧  $V_{osc}(k_0-1)$  を用いて、 $k_0$ パルス目の充電電圧  $V_{osc}(k_0)$  [ $=\Delta V_{osc}(k_0) + V_{osc}(k_0-1)$ ]が算出される(ステップS1402)。そして、充電電圧  $V_{osc}(k_0)$  にて $k_0$ パルス目のレーザ発振が行われ(ステップS1403)、増幅後のパルスエネルギー  $P_{amp}(k_0)$  が測定される(ステップS1404)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、パルスカウンタ $k_0$ に1がインクリメントされる(ステップS1405)。

[0254] この段階で、パルスカウンタ $k_0$ が $M$  [ $=1000$ ]を超えていない場合は、発振用レーザ100の充電電圧のチェックが行われる(ステップS1406の判断YES)。発振用レーザ100の充電電圧、すなわち発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサ $C_0$ の充電電圧の上限値  $V_{omax}$  は予め設定されており、最新の充電電圧  $V_{osc}(k_0-1)$  が上限充電電圧  $V_{omax}$  未満の場合は、再び上述したステップS1401以降の処理が行われる(ステップS1407の判断YES)。なお、発振用レーザ100のレーザガスが劣化すると、レーザのパルスエネルギーが低下する。パルスエネルギーの低下を防ぐために、充電電圧  $V_{osc}$  は徐々に高くされる。最新の充電電圧  $V_{osc}(k_0-1)$  が上限充電電圧  $V_{omax}$  以上である場合は、発振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS1407の判断NO、ステップS1408)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS1401以降の処理が行われる。

[0255] 上述したガス制御処理を行うことにより、発振用レーザ100のパルスエネルギーは回復し、これにともなって、発振用レーザ100の充電電圧  $V_{osc}$  の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。

[0256] ステップS1401〜ステップS1408の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_0$ が $M$  [ $=1000$ ]を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目 [ $=1001$ パルス目]になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS1406の判断NO)。

[0257] 次に、図20(b)を用いて増幅用レーザ300の制御について説明する。

図20(b)で示すように、増幅用レーザ300では、最初にパルスカウンタ $k_a$ にゼロが設定される(ステップS1231)。エネルギーコントローラ7では増幅用レーザ300の充電

電圧Vampに予め定められた初期値が設定され(ステップS1232)、パルスカウンタkaに1がインクリメントされる(ステップS1233)。ここでパルスカウンタkaが $M+1 [=1001]$ 未満であれば、設定された充電電圧Vampにてレーザ発振が行われる(ステップS1234の判断YES、ステップS1235)。第2モニタモジュール39ではパルスエネルギーPamp(ka)が測定され、このパルスエネルギーPamp(ka)を示す信号がエネルギーコントローラ7に出力される(ステップS1236)。

[0258] ここで、発振用レーザ100の充電電圧Vosc(ko)が上限充電電圧Vomax未満である場合且つ増幅用レーザ300のパルスエネルギーPamp(ka)が目標エネルギーPatgtである場合は、上述したステップS1233以降の処理が行われ、前パルスと同一の充電電圧Vampにてレーザ発振は継続される(ステップS1237の判断YES)。一方、発振用レーザ100の充電電圧Vosc(ko)が上限充電電圧Vomaxを上回った場合又は増幅用レーザ300のパルスエネルギーPamp(ka)が目標エネルギーPatgtでない場合は、パルスエネルギーPampの減少を防止するために、充電電圧Vampに予め定められた補正值 $\Delta V$ が加算される(ステップS1237の判断NO、ステップS1238)。補正值 $\Delta V$ だけ充電電圧Vampが増加されるため、増幅後のパルスエネルギーPampは上昇する。

[0259] レーザ発振の継続によってレーザガスの劣化が進行すると、上述したような充電電圧Vampの制御だけでは、充電電圧Vosc(ko)が上限充電電圧Vomaxを上回った場合又は増幅用レーザ300のパルスエネルギーPamp(ka)が目標エネルギーPatgtでない場合のパルスエネルギーPampの減少を防止することが困難になる。そこで、補正值 $\Delta V$ の加算によって補正された充電電圧Vampと上限充電電圧Vamaxとの比較判断がなされる(ステップS1239)。上限充電電圧Vamaxとは、増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0の充電電圧設定範囲(すなわち、充電器31の電圧設定範囲)内での最大充電電圧のことをいう。

[0260] 補正值 $\Delta V$ の加算によって補正された充電電圧Vampが上限充電電圧Vamax未満の場合は、補正された充電電圧Vampにて上述したステップS1233以降の処理が行われる(ステップS1239の判断YES)。一方、補正值 $\Delta V$ の加算によって補正された充電電圧Vampが上限充電電圧Vamax以上となった場合は、ガス制御処理によって発

振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS1239の判断NO、ステップS1240)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS1232以降の処理が行われる。

- [0261] ガス制御処理を行うことにより、充電電圧 $V_{amp}$ の制御だけで、充電電圧 $V_{osc}(k_0)$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ を上回った場合又は増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}(k_a)$ が目標エネルギー $P_{atgt}$ でない場合のパルスエネルギー $P_{amp}$ の減少の防止が可能となる。また、ガス制御処理にともなって、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。
- [0262] このように、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ の制御に加えて、上述したようなレーザガスの制御を行うことにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命)的にパルスエネルギー $P_{amp}$ の減少を抑制し、さらに、安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0263] ステップS1232〜ステップS1240の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_a$ が $M$ 〔=1000〕を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目〔=1001パルス目〕になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS1234の判断NO)。
- [0264] [2-2. 発振用レーザ:スパイク制御、毎パルス制御及び露光量一定制御]  
図23は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。  
図23に示す制御では、発振用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N$ パルス目までは $osc$ スパイク制御処理が行われ、 $N+1$ パルス目から $M$ パルス目までは $osc$ 毎パルス制御処理が行われ、 $M+1$ パルス目から $O$ パルス目までは $S$ パルス分の増幅後の積算エネルギーが一定となるように発振用レーザ100による露光量一定制御処理(以下、 $osc$ 露光量一定制御処理という)が行われる。なお、各処理の説明では、具体的なパルス数として $N=3$ 、 $M=39$ 、 $O=1000$ 、 $S=40$ という数値を用いている。
- [0265] 上記[2-1]と同様に、発振用レーザ100と増幅用レーザ300は同期運転される。なお、増幅用レーザの制御は[2-1]で説明した図20(b)の制御フローのように行われるため、その説明を省略する。

[0266] 次に、図23(a)、図24を用いて発振用レーザ100の制御について説明する。

図23(a)で示すように、発振用レーザ100では、レーザ発振開始からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間はoscスパイク制御処理が行われ(ステップS1511)、N+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間はosc毎パルス制御処理が行われ(ステップS1512)、M+1パルス目〔＝40パルス目〕からOパルス目〔＝1000パルス目〕までの間はSパルス分〔＝40パルス分〕の露光量を一定にするosc露光量一定制御処理(ステップS1513)が行われる。

[0267] oscスパイク制御処理(ステップS1511)及びosc毎パルス制御処理(ステップS1512)については上記〔2-1〕で既に説明したため、ここではosc露光量一定制御処理(ステップS1513)を中心に説明する。

[0268] osc毎パルス制御処理において、パルスカウンタkoがM〔＝39〕を超えた場合、すなわちM+1パルス目〔＝40パルス目〕になると、osc毎パルス制御処理からosc露光量一定制御処理に移行する(ステップS1406の判断NO)。

[0269] 図24はosc露光量一定制御処理の処理フローを示す図である。

osc露光量一定制御処理を行う場合、第1回目の積算を行うために、図23(a)に示すステップS1511のoscスパイク制御処理及びステップS1512osc毎パルス制御処理と平行して以下の準備工程が行われる。

[0270] 準備工程では予め、積算開始パルス数iに1がストアされ、積算終了パルス数jにi+(S-1)〔＝40〕がストアされる(ステップS1601)。そして、koパルス目〔＝41パルス目〕のレーザ発振が行われる(ステップS1602)。なお、このステップS1002の処理は、パルスカウンタkaが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図21に示すoscスパイク制御処理のステップS1308の処理と同一である。また、パルスカウンタkaがN+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図22に示すamp毎パルス制御処理のステップS1403の処理と同一である。

[0271] 次に、測定した増幅用レーザ300のパルスエネルギーPamp(ko)が記憶される。すなわち、パルスカウンタkoが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図21に示すoscスパイク制御処理のステップS1309で測定されたパルスエネルギーPamp(ko)が記憶される。また、パルスカウンタkoがN+1パルス目〔＝4パルス目〕か



らMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図22に示すosc毎パルス制御処理のステップS1404で測定されたパルスエネルギーPamp(ko)が記憶される(ステップS1603)。

[0272] そして、パルスカウンタkoに1がインクリメントされる(ステップS1604)。なお、このステップS1604の処理は、パルスカウンタkoが1パルス目からNパルス目〔＝3パルス目〕までの間は、図21に示すoscスパイク制御処理のステップS1311の処理と同一である。また、パルスカウンタkaがN+1パルス目〔＝4パルス目〕からMパルス目〔＝39パルス目〕までの間は、図22に示すosc毎パルス制御処理のステップS1405の処理と同一である。以上のレーザ発振及びパルスエネルギーの測定はパルスカウンタkoがj-1になるまで繰り返される(ステップS1605の判断YES)。

[0273] パルスカウンタkoが積算終了パルス数jとなった場合、すなわち積算終了パルスの発振段階となった場合に、osc一定制御処理の本工程に移行する(ステップS1605の判断NO)。

[0274] 本工程では、iパルス目からj-1パルス目までの積算エネルギー、すなわちS-1パルス分の積算エネルギーD(i)の算出が行われる。iパルス目からS-1パルス分の積算エネルギーD(i)は下記(1)式にて算出される(ステップS1606)。

[数2]

$$D(i) = \sum_{n=i}^{j-1} P_{amp}(n) \quad (1)$$

[0275] Sパルス分〔＝40パルス分〕の目標積算エネルギーは予めD0と定められており、この目標積算エネルギーD0と上記(1)式にて算出したS-1パルス分〔＝39パルス分〕の積算エネルギーD(i)との差P(ko)〔＝D0-D(i)〕が算出される。算出したP(ko)は、Sパルス分の積算エネルギーをD0とするためのko〔＝j〕パルス目における目標エネルギーである(ステップS1607)。

[0276] 目標エネルギーP(ko)と増幅用レーザ300の1パルス前のパルスエネルギーPamp(ko-1)との差ΔP(ko)〔＝P(ko)-Pamp(ko-1)〕が算出され、この算出結果ΔP(ko)を用いて、koパルス目すなわち積算終了パルスjの発振用レーザ100の充電電圧

の補正值  $\Delta V(ko)$  [ $=e \times \Delta P(ko)$ 、但し  $e$  は定数] が算出される。この補正值  $\Delta V(ko)$  及び1パルス前の充電電圧  $V_{osc}(ko-1)$  を用いて、 $ko$ パルス目の充電電圧  $V_{osc}(ko)$  [ $=\Delta V(ko) + V_{osc}(ko-1)$ ] が算出される(ステップS1608)。

[0277] そして、充電電圧  $V_{osc}(ko)$  にて  $ko$ パルス目のレーザ発振が行われる(ステップS1609)。レーザ発振に伴い増幅後のパルスエネルギー  $P_{amp}(ko)$  が測定され、記憶される(ステップS1610)。

[0278] 露光装置3側で、露光量安定性の検定を行う場合には、ステップS1606で算出したS-1パルス分[=39パルス分]の積算エネルギー  $D(i)$  及び増幅後のパルスエネルギー  $P_{amp}(ko)$  を用いて、Sパルス分[=40パルス分]の積算エネルギー  $D(ko)$  [ $=D(i) + P_{amp}(ko)$ ] が算出され、算出データが露光装置3に送信される(ステップS1611)。露光装置3は、例えば、検定の結果算出データが露光量安定性の仕様範囲外であった場合、露光を中止する。なお、露光装置3側で露光量安定性の検定を行わない場合は、ステップS1611は省略してもよい。

[0279] この段階で、パルスカウンタ  $ko$  が  $O$  [=1000] 未満の場合は、パルスカウンタ  $ko$  に1がインクリメントされる(ステップS1612の判断YES、ステップS1613)。最新の発振用レーザ100の充電電圧  $V_{osc}(ko-1)$  が上限充電電圧  $V_{omax}$  未満の場合は、積算開始パルス数  $i$  に1がインクリメントされ、積算終了パルス数  $j$  に1がインクリメントされ、更に上述したステップS1606以降の処理が行われる(ステップS1614の判断YES、ステップS1616)。一方、最新の充電電圧  $V_{osc}(ko-1)$  が上限充電電圧  $V_{omax}$  以上である場合は、発振用チャンバ10内のレーザガスが制御された後、積算開始パルス数  $i$  に1がインクリメントされ、積算終了パルス数  $j$  に1がインクリメントされ、更に上述したステップS1606以降の処理が行われる(ステップS1614の判断NO、ステップS1615、ステップS1616)。

[0280] ステップS1606〜ステップS1616の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ  $ko$  が  $O$  [=1000] になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS1612の判断NO)。

[0281] ここまで説明してきた第2の制御例によれば、2ステージレーザのパルスエネルギー制御を高精度に行うことができる。したがって、2ステージレーザのパルスエネルギー

を安定させることができる。

- [0282] 第2の制御例は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーが増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域(図6の領域1)である場合、増幅後のパルスエネルギーがシード光のエネルギーの変動に依存するという特性を利用したものである。よって、増幅後のパルスエネルギーは、発振用レーザ100の充電電圧、すなわち発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0の充電電圧によって決定される。
- [0283] 第2の制御例において、増幅用レーザ300の制御は、シード光のパルスエネルギー制御によって増幅後のレーザ光のパルスエネルギーが目標エネルギー $P_{tgt}$ となるような増幅強度(すなわち、増幅用レーザ300の電極間への印加電圧の値)を維持する程度の簡便な制御(例えば、増幅用レーザの充電電圧を一定にする)でよく、実質的に発振用レーザ100の制御が厳密に行われるのみである。増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定し、この測定結果に基づいて、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ をパルス毎に制御(oscスパイク制御処理、osc毎パルス制御処理、osc露光量一定制御処理等)することにより増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー制御が実現できる。
- [0284] このように、第2の制御例は、第1の制御例と同様、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の制御分担を明確に分けて制御することができるため、制御の安定性がよく、誤差が生じ難い。したがって、制御の精度を向上させることができるといえる。また、本制御例のように一方が簡便で、他方が厳密であるような制御は容易な制御であるためコントローラの演算負荷が小さい。したがって、高性能のコントローラを必要としないため、コストを低減できる。
- [0285] また、発振用レーザ、増幅用レーザのガス圧、ガス組成を変化させる制御を併用することにより、中期(ガスライフ中)及び長期(レーザチャンバの寿命期間)の出力低下を補うパルスエネルギー制御が可能となり、長期にわたって安定したパルスエネルギー制御が可能となる。
- [0286] [3. 第3の制御例]

図25は第3の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。

図25に示す個々の矩形波等は1バーストの充電電圧、パルスエネルギーを示す。

第3の制御例は、目標とするパルスエネルギーに応じて、発振用レーザ100の充電電圧及び増幅用レーザ300の充電電圧を変化させるものである。

[0287] 第3の制御例の概要を説明する。発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ がパルス毎に制御(後述する第2oscスパイク制御処理、第2osc毎パルス制御処理)され(図25(a)参照)、第1モニタモジュール19で測定した発振用レーザ100のパルスエネルギー $P_{osc}$ (即ち、増幅用レーザ300に注入されるシード光のパルスエネルギー)が目標エネルギー $P_{otgt}$ にされる(図25(b)参照)。そして、増幅用レーザ300のパルスエネルギー $P_{amp}$ を第2モニタモジュール39で測定して、この測定値が目標エネルギー $P_{atgt}$ となるように(図25(d)参照)、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ がパルス毎に制御(上述した、ampスパイク制御処理、amp毎パルス制御処理、amp露光量一定制御処理等)される(図25(c)参照)。

[0288] 第3の制御例の制御フローは、図26、図29に示す通りである。なお、ここではMoP方式の2ステージレーザの場合を例にしているが、MOPA方式の2ステージレーザの場合も、同様の制御となる。

[0289] 図26は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

図26に示す制御は、発振用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N_o$ パルス目までは第2oscスパイク制御処理が行われ、 $N_o + 1$ パルス目から $M$ パルス目までは第2osc毎パルス制御処理が行われる。また、増幅用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N_a$ パルス目まではampスパイク制御処理が行われ、 $N_a + 1$ パルス目から $M$ パルス目まではamp毎パルス制御処理が行われる。ampスパイク制御処理及びamp毎パルス制御処理については上述したため、以下ではその説明を省略する。

[0290] 図29は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

図29に示す制御は、発振用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N_o$ パルス目までは第2oscスパイク制御処理が行われ、 $N_o + 1$ パルス目から $O$ パルス目までは第2osc毎パルス制御処理が行われる。また、増幅用レーザにおいて、1バーストのうち1パルス目から $N_a$ パルス目まではampスパイク制御処理が行われ、 $N_a + 1$ パル

ス目からMaパルス目まではamp毎パルス制御処理が行われ、Ma+1パルス目からOpals目まではamp毎露光量一定制御処理が行われる。amp毎露光量一定制御処理については上述したため、以下ではその説明を省略する。

[0291] 図27は第2oscスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

第2oscスパイク制御処理では、レーザ発振開始前に以下の前処理が行われる。メインコントローラ4又はエネルギーコントローラ7ではバースト間のレーザ休止時間が図示しない休止時間カウンタTで計時されている(ステップS1901)。露光装置3から発振指令が出力されると、休止時間の計時は停止される(ステップS1902)。

[0292] 本レーザシステムには図示しないデータベースが設けられており、発振用レーザ100の目標エネルギーPotgt及び休止時間と、Vtosc-Ptoscデータテーブルとが対応付けられて記憶されている。Vtosc-Ptoscデータテーブルとは、第2oscスパイク制御処理における各パルス毎のデータ実績であり、発振用レーザ100の充電電圧VoscのデータVtoscと発振用レーザ100のレーザパルスエネルギーPtoscのデータPtoscとで構成されている。休止時間カウンタTによって休止時間が特定され、この休止時間T及び目標エネルギーPotgtに対応するVtosc-Ptoscデータテーブルが検索され、エネルギーコントローラ7に取り入れられる(ステップS1903)。そして、休止時間カウンタTはリセットされる(ステップS1904)。

[0293] 上記前処理が終了すると、レーザ発振パルスカウンタkoに初期値1が設定され(ステップS1905)、パルスカウンタkoが $N [= 3]$ を超えるまで、すなわち1〜3パルスの間は以下の処理が繰り返し行われる(ステップS1906の判断YES)。

[0294] Vtosc-Ptoscデータテーブルのうちのkoパルス目のパルスエネルギーPtosc(ko)と目標エネルギーPotgtとの差 $\Delta Ptosc(ko) [= Ptosc(ko) - Potgt]$ が算出され、この算出結果 $\Delta Ptosc(ko)$ を用いて、koパルス目の発振用レーザ100の充電電圧の補正值 $\Delta Vtosc(ko) [= c \times \Delta Ptosc(ko)$ 、但しcは定数]が算出される。Vtosc-Ptoscデータテーブルのうちのkoパルス目の充電電圧Vtoscと、補正值 $\Delta Vtosc(ko)$ と、を用いて、実際のkoパルス目の充電電圧Vosc(ko)  $[= Vtosc(ko) + \Delta Vtosc(ko)]$ が算出される(ステップS1907)。

[0295] そして、充電電圧Vosc(ko)にてkoパルス目のレーザ発振が行われ、そのパルスエ

エネルギー $P_{osc}(k_o)$ が第1モニタモジュール19で測定される(ステップS1908、ステップS1909)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、先の休止時間及び目標エネルギー $P_{otgt}$ に対応する $V_{tosc}$ - $P_{tosc}$ データテーブルのデータのうち、 $k_o$ パルス目の充電電圧 $V_{tosc}(k_o)$ とパルスエネルギー $P_{tosc}(k_o)$ が、算出された実際の充電電圧 $V_{osc}(k_o)$ と測定されたパルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ で更新され(ステップS1910)、パルスカウンタ $k_o$ に1がインクリメントされる(ステップS1911)。

[0296] ステップS1906〜ステップS1911の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $k_o$ が $N$ 〔 $=3$ 〕を超えた場合、すなわち $N+1$ パルス目〔 $=4$ パルス目〕になると、第2oscスパイク制御処理から第2osc毎パルス制御処理に移行する(ステップS1906の判断NO)。

[0297] 図28は第2osc毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。

第2osc毎パルス制御処理で使用されるパルスカウンタ $k_o$ は、第2oscスパイク制御処理で使用されたパルスカウンタ $k_o$ と同一である。よって、第2oscスパイク制御でカウントされたパルス数は第2osc毎パルス制御処理に引き継がれる。

[0298] 1パルス前のパルスエネルギー $P_{osc}(k_o-1)$ と目標エネルギー $P_{otgt}$ との差 $\Delta P_{osc}(k_o)$ 〔 $=P_{osc}(k_o-1)-P_{otgt}$ 〕が算出され、この算出結果 $\Delta P_{osc}(k_o)$ を用いて、 $k_o$ パルス目の発振用レーザ100の充電電圧の補正值 $\Delta V_{osc}$ 〔 $=a \times \Delta P_{osc}(k_o)$ 、但し $a$ は定数〕が算出される(ステップS2001)。この補正值 $\Delta V_{osc}$ 及び1パルス前の充電電圧 $V_{osc}(k_o-1)$ を用いて、 $k_o$ パルス目の充電電圧 $V_{osc}(k_o)$ 〔 $=\Delta V_{osc}(k_o)+V_{osc}(k_o-1)$ 〕が算出される(ステップS2002)。そして、充電電圧 $V_{osc}(k_o)$ にて $k_o$ パルス目のレーザ発振が行われ(ステップS2003)、そのパルスエネルギー $P_{osc}(k_o)$ が測定される(ステップS2004)。レーザ発振及びエネルギー測定に伴い、パルスカウンタ $k_o$ に1がインクリメントされる(ステップS2005)。

[0299] この段階で、パルスカウンタ $k_o$ が $M$ 〔 $=1000$ 〕を超えていない場合は、発振用レーザ100の充電電圧のチェックが行われる(ステップS2006の判断YES)。発振用レーザ100の充電電圧、すなわち発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサ $C_0$ の充電電圧の上限値 $V_{omax}$ は予め設定されており、最新の充電電圧 $V_{osc}(k_o-1)$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ 未満の場合は、再び上述したステップS2001以降の処理が行われる(ステップS2007の判断YES)。なお、発振用レーザ100のレーザガスが

劣化すると、レーザのパルスエネルギーが低下する。パルスエネルギーの低下を防ぐために、充電電圧 $V_{osc}$ は徐々に高くされる。最新の充電電圧 $V_{osc}(k-1)$ が上限充電電圧 $V_{omax}$ 以上である場合は、発振用チャンバ10内のレーザガスが制御される(ステップS2007の判断NO、ステップS2008)。ガス制御処理が終了すると、更に上述したステップS2001以降の処理が行われる。

- [0300] 上述したガス制御処理を行うことにより、発振用レーザ100のパルスエネルギーは回復し、これにともなって、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ の値を、運転開始当初の初期値付近に戻すことが可能となる。
- [0301] ステップS2001〜ステップS2008の処理は繰り返し行われ、パルスカウンタ $ko$ が $M$ 〔=1000〕を超えた場合、すなわち $M+1$ パルス目〔=1001パルス目〕になると、レーザ発振は停止され、1バーストのレーザ発振が終了する(ステップS2006の判断NO)。
- [0302] ここまで説明してきた第3の制御例によれば、2ステージレーザのパルスエネルギー制御を高精度に行うことができる。したがって、2ステージレーザのパルスエネルギーを安定させることができる。
- [0303] 第3の制御例は、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギーを所定の目標エネルギー $P_{otgt}$ となるように維持するものである。目標エネルギー $P_{otgt}$ の設定領域は、増幅飽和領域の下限エネルギー $E_{s0}$ 以下の領域(図6の領域1)でも下限エネルギー $E_{s0}$ 以上の領域(図6の領域2)でも構わず任意である。そしてシード光のパルスエネルギーを目標エネルギー $P_{otgt}$ に維持した上で、増幅用レーザ300の充電電圧、すなわち増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサ $C0$ の充電電圧によって増幅後のパルスエネルギーを決定する。
- [0304] すなわち、第3の制御例によれば、発振用レーザ100から出力され増幅用レーザ300に注入されるレーザ光(シード光)のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定し、この測定結果に基づいて、発振用レーザ100の充電電圧 $V_{osc}$ をパルス毎に制御(第2 $osc$ スパイク制御処理、第2 $osc$ 毎パルス制御処理等)し、一方、増幅後のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定し、この測定結果に基づいて、増幅用レーザ300の充電電圧 $V_{amp}$ をパ

ルス毎に制御(ampスパイク制御処理、amp毎パルス制御処理、amp露光量一定制御処理等)しているので、増幅後のレーザ光の高精度なパルスエネルギー制御が実現できる。また、このように制御が独立して行われるため、高精度なエネルギー制御が可能となる。

[0305] 第3の制御例では、シード光のパルスエネルギーを高精度に制御しているので、シード光のエネルギー変動による増幅後のレーザ光のパルスエネルギーへの影響を低減できる。仮に、シード光の目標エネルギーPotgtが増幅飽和領域内にあった場合、第1の制御例よりも、シード光のエネルギー変動による増幅後のレーザ光のパルスエネルギーへの影響をさらに小さくできる。一方、発振用レーザ、増幅用レーザ両者とも厳密な精度を行うので、第1の制御例と比較すれば、コントローラの演算負荷は大きい。

[0306] なお、図26に示す発振用レーザ100と増幅用レーザ300のスパイク制御、毎パルス制御においては、それぞれのパルス数を一致させることが望ましい( $N_o = N_a$ 、 $M_o = M_a$ )。一致させることによって、発振用レーザ100と増幅用レーザ300の制御性よくなり、パルスエネルギーの高精度化が可能となる。

[0307] 本発明の2ステージレーザのパルスエネルギーの制御例は、上述した第1、第2、第3の制御例の通りであるが、これに限るものではない。

[0308] なお、先に述べた通り、レーザ光の検出を、増幅用レーザ300の出口から露光装置3の露光対象(例えば、ウエハ)までの光路の任意の地点において行ってよい。すなわち、レーザ光の検出には、第2モニタモジュール39、または露光装置3に設けられた出力モニタ51、または光路中に設けられた図示しない出力モニタのいずれかが用いられる。なお、レーザ光の検出を増幅用レーザ300の出口近傍よりも、上述した光路中、特に露光対象(例えば、ウエハ)に出来るだけ近い地点で行うと、光路中の光学素子等の影響によるパルスエネルギーの変動の影響も検出しやすくなり、露光装置における露光量の制御を高精度に行うことが可能となる。

[0309] 特に、高精度に露光対象(例えば、ウエハ)上での露光量を制御したい場合は、露光装置3に設けられた出力モニタ51の検出結果に基づいて、2ステージレーザの制御を行うことが必要となる。この場合は、高速にデータ信号を送受信する必要がある。



高速にデータ信号を送受信しない場合は、露光装置3からの制御指令信号に基づいてメインコントローラ4が各コントローラ5〜7に制御指令信号を送信するようにしているが、高速にデータ信号を送受信する場合は、露光装置3のコントローラ52が直接各コントローラ5〜7に制御指令信号を送信するようにしてもよい。例えば、コントローラ52がエネルギーコントローラ7に目標エネルギーPatgtを指令したり、充電電圧Vosc、Vampを指令してもよい。

- [0310] また、上述した第1、第2、第3の制御例では、エネルギーコントローラ7のパルスカウンタでレーザのパルス数をカウントし、それに基づいて1バーストの開始、終了を認識して、1バーストの毎パルス制御を行うが、これに限られるものではない。例えば、露光装置3のコントローラ52からエネルギーコントローラ7に外部トリガ信号が入力され、この信号に基づいて、1バーストの毎パルス制御を行ってもよい。
- [0311] このような場合は、パルスカウンタのカウント数を用いて1バーストの開始、終了を判断する代わりに、外部トリガ休止タイマを設け、このタイマのカウント結果から所定の時間が経過するとバーストの先頭パルスと認識するようにしてもよい。
- [0312] 図1に示す2ステージレーザには、発振用レーザ100に充電器11が設けられ、増幅用レーザ300に充電器31が設けられている。ところで、2台の充電器11、31の充電精度にばらつきがあると、各高電圧パルス発生器12、32の主コンデンサC0へ実際に充電される電圧は、電圧Vosc、Vampに対して誤差を含んだものとなる。すなわち、各高電圧パルス発生器12、32に設けられた固体スイッチSWにトリガ信号が入力されてON状態になってから、発振用チャンバ10、増幅用チャンバ30内で放電が発生するまでの時間が変動する。このような場合、発振用レーザ100の放電と増幅用レーザ300の放電との間の同期精度がばらつく。
- [0313] そこで、1台の充電器で、発振用レーザ100の発振用高電圧パルス発生器12に設けられた主コンデンサC0と、増幅用レーザ300の増幅用高電圧パルス発生器32に設けられた主コンデンサC0とを充電するようにしてもよい。充電器が1台の場合は、充電器の製作精度のばらつきに起因する発振用レーザ100と増幅用レーザ300との同期の変動を小さくすることが可能となる。先に説明したとおり、同期コントローラ8はエネルギーコントローラ7から次回放電の充電電圧(電圧Vosc、Vamp)を指示する信

号を受け取り、この指示内容から前記Vt積特性を考慮して遅延時間を決定する。

- [0314] 充電器が1台の場合は、それぞれ個別の充電精度を有する2台の場合と比較して、充電器の充電精度が上述した同期精度に及ぼす影響を小さくすることができる。そのため、より高精度同期に適していると考えられる。
- [0315] 一方、充電器が2台の場合は、次の点で充電器が1台の場合よりも優れているといえる。
- [0316] 充電器が1台の場合は、常に発振用高電圧パルス発生器12と増幅用高電圧パルス発生器32のそれぞれの主コンデンサC0を充電する。ここで、発振用チャンバ10、増幅用チャンバ30のいずれか一方のみを交換する場合を考える。この場合、チャンバを交換した側のレーザ装置を所定の性能に復帰させる立ち上げ作業が行われる。充電器が1台の場合は、一方のレーザ装置の立ち上げ作業に伴い、立ち上げ作業が不要な他方のレーザ装置の高電圧パルス発生器に設けられた主コンデンサC0も充電され、無駄な放電が発生する。よって、その分だけレーザ装置の寿命が短くなる。例えば、無駄な放電により、チャンバ内の電極の摩耗等が進み、チャンバの寿命が短くなる。また、立ち上げ作業時は、レーザ装置の各構成要素を覆うカバーは開放状態にある。そのため、立ち上げ作業が不要な他方のレーザ装置の放電に起因するノイズ発生の影響を受けやすくなる。
- [0317] 発振用レーザ100、増幅用レーザ300の各高電圧パルス発生器12、32のいずれかが故障して交換する際にも同じことがいえる。
- [0318] また、発振用レーザ100において、LNM16を調整して発振波長を調整したり、LNM16を交換して取り付け作業を行う場合においても、充電器が1台の場合は、本来動作させる必要のない増幅用レーザ300をも動作させることになるので、同じことがいえる。
- [0319] 充電器が2台の場合は、このようなことは発生しない。したがって、チャンバの長寿命化や上述したノイズの影響を受けないといった利点がある。しかしながら、充電器の充電精度が上述した同期精度に及ぼす影響が大きくなるので、各充電器11、31の充電精度が高精度であるように設計する必要がある。
- [0320] なお、第1の制御例の変形例、すなわち発振用レーザ100における充電電圧の電

圧変化割合と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化割合とを略一致させる制御や、発振用レーザ100における充電電圧の電圧変化量と増幅用レーザ300における充電電圧の電圧変化量とを略一致させる制御は、充電器が2台であることを想定している。発振用レーザ100における充電器11の充電電圧設定範囲が $V_{co1} \sim V_{co2}$  ( $V_{co1} < V_{co2}$ ) であり、増幅用レーザ300における充電器31の充電電圧設定範囲が、 $V_{ca1} \sim V_{ca2}$  ( $V_{ca1} < V_{ca2}$ ) であるため、充電器は2台必要である。

- [0321] 2ステージレーザとしてMOPO方式を採用する場合、MOPO方式では、一般的に、発振用レーザ100から増幅用レーザ300へ注入されるシード光のパルスエネルギーは比較的小さくて良い。よって、発振用レーザ100における充電器11の充電電圧設定範囲は、増幅用レーザ300における充電器31の充電電圧設定範囲より低電圧側に設定されることがある。ここで、充電器11、31の充電電圧設定範囲が同じであったとしても、発振用レーザ100ではLNM16によってレーザ光(シード光)の狭帯域化が行われるので、狭帯域化しない場合と比較するとシード光のパルスエネルギーは小さくなる。しかし、その場合でもシード光のエネルギーは必要以上に大きいことが多い。そのため、発振用レーザ100における充電器11の充電電圧設定範囲を、増幅用レーザ300における充電器31の充電電圧設定範囲より低電圧側に設定することが望ましく、充電器を2台使用することが有効となる。

#### 産業上の利用可能性

- [0322] 本発明は、例えばリソグラフィ用光源として使用されるエキシマレーザ装置やフッ素分子レーザ装置に適用できる。

#### 図面の簡単な説明

- [0323] [図1]図1は本実施形態に係るレーザシステムの構成図である。  
[図2]図2(a)は発振用チャンバの構成図であり、図2(b)は増幅用チャンバの構成図である。  
[図3]図3(a)、(b)は電源及びチャンバ内部の回路構成の一例を示す図である。  
[図4]図4は各高電圧パルス発生器の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極間に放電が発生するまでの時間と主コンデンサC0の充電電圧との関係を示す図である。

[図5]図5は各高電圧パルス発生器の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極間に放電が発生するまでの時間と主コンデンサC0の充電電圧との関係を示す図である。

[図6]図6は増幅用レーザに注入されるシード光のエネルギーと増幅後のエネルギーの関係を示す図である。

[図7]図7は第1の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。

[図8]図8は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

[図9]図9はガス制御処理の処理フローを示す図である。

[図10]図10はampスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

[図11]図11はamp毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。

[図12]図12は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

[図13]図13はamp露光量一定制御処理の処理フローを示す図である。

[図14]図14は各高電圧パルス発生器の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極間に放電が発生するまでの時間と主コンデンサC0の充電電圧との関係を示す図である。

[図15]図15は各高電圧パルス発生器の固体スイッチSWがオン状態になってから、電極間に放電が発生するまでの時間と主コンデンサC0の充電電圧との関係を示す図である。

[図16]図16は発振用レーザの制御フローを示す図である。

[図17]図17は発振用レーザの制御フローを示す図である。

[図18]図18は発振用レーザの制御フローを示す図である。

[図19]図19は第2の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。

[図20]図20は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

[図21]図21はoscスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

[図22]図22はosc毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。

[図23]図23は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

[図24]図24はosc露光量一定制御処理の処理フローを示す図である。

[図25]図25は第3の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図である。

[図26]図26は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

[図27]図27は第2oscスパイク制御処理の処理フローを示す図である。

[図28]図28は第2osc毎パルス制御処理の処理フローを示す図である。

[図29]図29は発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フローを示す図である。

### 符号の説明

- [0324] 2…2ステージレーザ、3…露光装置、  
4…メインコントローラ、5…ユーティリティコントローラ、  
6…波長コントローラ、7…エネルギーコントローラ、8…同期コントローラ、  
100…発振用レーザ(osc)、10…発振用チャンバ、11…充電器、  
12…発振用高電圧パルス発生器、  
14…ガス供給・排気ユニット、15…冷却水供給ユニット、  
16…LNM(狭帯域化モジュール)、17…フロントミラー、  
19…モニタモジュール、20…放電検出部、  
300…増幅用レーザ(amp)、30…増幅用チャンバ、31…充電器、  
32…増幅用高電圧パルス発生器、  
34…ガス供給・排気ユニット、35…冷却水供給ユニット、  
36…リア側ミラー36、37…出力ミラー、  
39…モニタモジュール、40…放電検出部

## 請求の範囲

- [1] 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、
- 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、
- 前記レーザ光のパルスエネルギーPampを測定するモニタモジュールと、を備え、
- 前記レーザ光のパルスエネルギーPampを制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、
- 前記モニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギーPampが光増幅段の目標エネルギーPatgtとなるように前記光発振段及び前記光増幅段を制御すること
- を特徴とする2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。
- [2] 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、
- 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定する第1のモニタモジュールと、  
前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定する第2のモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記第1のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ が所定エネルギー $E_{s0}$ 以上となるように前記光発振段を制御し、

前記第2のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように前記光増幅段を制御し、

且つ、前記所定エネルギー $E_{s0}$ は、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ の変動に伴う前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ の変動の割合が所定値以下となるような増幅飽和領域内に設定されていること

を特徴とする2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [3] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御し、  
前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御すること

を特徴とする請求の範囲2記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [4] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御することに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲2記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [5] 前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ とを略同一にすること

を特徴とする請求の範囲3もしくは請求の範囲4記載の2ステージレーザのパルスエ

エネルギー制御装置。

- [6] 前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ の変化割合と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ の変化割合とを略同一にすること  
を特徴とする請求の範囲3もしくは請求の範囲4記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。
- [7] 前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ の変化量と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ の変化量とを略同一にすること  
を特徴とする請求の範囲3もしくは請求の範囲4記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。
- [8] 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルス印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、  
内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シード光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルス印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、  
前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定するモニタモジュールと、を備え、  
前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、  
前記モニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{tgt}$ となるように前記光発振段を制御するようにし、  
且つ、前記目標エネルギー $P_{tgt}$ は、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ の変動に伴う前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ の変動の割合が所定値以上となるような領域内に設定されていること



を特徴とする2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [9] 前記光発振段を制御しても前記レーザ光のパルスエネルギーPampが光増幅段の目標エネルギーPatgtとならない場合に、前記光増幅段を制御すること

を特徴とする請求の範囲8記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [10] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御すること

を特徴とする請求の範囲8記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

- [11] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲8記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [12] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御し、  
前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧Vampを制御すること

を特徴とする請求の範囲9記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

- [13] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧Voscを制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧Vampを制御することに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲9記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

- [14] 内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられた発振用チャンバと、発振用チャンバ内のレーザガスを励起するために発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記発振用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する発振用高電圧パルス発生器と、を有しシード光を出力する光発振段と、

内部にレーザガスが封入されかつ互いに対向する1対の電極が設けられ、前記シー

ド光が注入される増幅用チャンバと、前記シード光を増幅するために増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して前記増幅用チャンバ内の一対の電極に高電圧パルスを印加する増幅用高電圧パルス発生器と、を有し前記シード光が増幅されたレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ を測定する第1のモニタモジュールと、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を測定する第2のモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記第1のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記シード光のパルスエネルギー $P_{osc}$ が光発振段の目標エネルギー $P_{otgt}$ となるように前記光発振段を制御し

、  
前記第2のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー $P_{amp}$ が光増幅段の目標エネルギー $P_{atgt}$ となるように前記光増幅段を制御するようにしたこと

を特徴とする2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

[15] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御すること

を特徴とする請求の範囲14記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

[16] 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧 $V_{osc}$ を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧 $V_{amp}$ を制御することに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲14記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

。

- [17] 請求の範囲1乃至16記載の2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置と、前記レーザ光を用いて露光対象を露光する露光装置と、を備えたことを特徴とする2ステージレーザシステム。
- [18] 前記2ステージレーザは、KrFレーザ、ArFレーザ、フッ素分子レーザのいずれかであることを特徴とする請求の範囲17記載の2ステージレーザシステム。

## 補正書の請求の範囲

[2005年1月25日 (25. 01. 05) 国際事務局受理：出願当初の請求の範囲2,8,17は補正された；出願当初の請求の範囲1,14,15,16は取り下げられた；他の請求の範囲は変更なし。(7頁)]

## 1. (削除)

2. (補正後) 発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して発振用チャンバ内に設けられた互いに対向する一対の電極に印加し、発振用チャンバ内のレーザガスを励起してシード光を出力する光発振段と、増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して増幅用チャンバ内に設けられた互いに対向する一対の電極に印加し、増幅用チャンバ内のレーザガスを励起して増幅用チャンバ内に注入された前記シード光を増幅しレーザ光を出力する光増幅段と、からなる2ステージレーザと、

前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  を測定する第1のモニタモジュールと、  
前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  を測定する第2のモニタモジュールと、  
を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  を制御する2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記第1のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が所定エネルギー  $E_{s0}$  以上となるように前記光発振段を制御し、

前記第2のモニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が前記光増幅段の目標エネルギー  $P_{atgt}$  となるように前記光増幅段を制御し、

前記所定エネルギー  $E_{s0}$  は、前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増加しても前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が殆ど増加せずに飽和する増幅飽和領域と、前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増加すると前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が増加する増幅飽和領域外の領域と、の閾値である増幅飽和領域の下限エネルギー値に設定されること

を特徴とする2ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

3. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  を制御すること

を特徴とする請求の範囲 2 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

4. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  を制御することに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲 2 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

5. 前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  とを略同一にすること

を特徴とする請求の範囲 3 もしくは請求の範囲 4 記載の 2 ステージレーザのパルスエ

エネルギー制御装置。

6. 前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  の変化割合と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  の変化割合とを略同一にすること

を特徴とする請求の範囲 3 もしくは請求の範囲 4 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

7. 前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  の変化量と、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  の変化量とを略同一にすること

を特徴とする請求の範囲 3 もしくは請求の範囲 4 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

8. (補正後) 発振用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して発振用チャンバ内に設けられた互いに対向する一対の電極に印加し、発振用チャンバ内のレーザガスを励起してシード光を出力する光発振段と、増幅用コンデンサに充電されたエネルギーをパルス圧縮して増幅用チャンバ内に設けられた互いに対向する一対の電極に印加し、増幅用チャンバ内のレーザガスを励起して増幅用チャンバ内に注入された前記シード光を増幅しレーザ光を出力する光増幅段と、からなる 2 ステージレーザと、

前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  を測定するモニタモジュールと、を備え、

前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  を制御する 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置において、

前記光発振段を制御すれば前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が光増幅段の目標エネルギー  $P_{atgt}$  となる場合に、

前記モニタモジュールの測定結果に基づいて、前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が光増幅段の目標エネルギー  $P_{atgt}$  となるように前記光発振段をパルス毎に制御し、

前記光増幅段の電圧をほぼ一定に制御し、

前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  の制御領域が、前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増加しても前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が殆ど増加

せずに飽和する増幅飽和領域と、前記シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増加すると前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が増加する増幅飽和領域外の領域と、のうちの増幅飽和領域外の領域であること

を特徴とする 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

9. 前記光発振段を制御しても前記レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$  が光増幅段の目標エネルギー  $P_{tgt}$  とならない場合に、前記光増幅段を制御すること

を特徴とする請求の範囲 8 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

10. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御すること

を特徴とする請求の範囲 8 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

11. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲 8 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

12. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  を制御すること

を特徴とする請求の範囲 9 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置

13. 前記光発振段の制御では、前記発振用コンデンサへの充電電圧  $V_{osc}$  を制御することに加え、前記発振用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御し、

前記光増幅段の制御では、前記増幅用コンデンサへの充電電圧  $V_{amp}$  を制御することに加え、前記増幅用チャンバ内のレーザガス圧およびレーザガスの組成の少なくとも一方を制御すること

を特徴とする請求の範囲 9 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置。

14. (削除)



1 5. (削除)

1 6. (削除)

17. (補正後) 請求の範囲 2 乃至 13 記載の 2 ステージレーザのパルスエネルギー制御装置と、前記レーザ光を用いて露光対象を露光する露光装置と、を備えたこと

を特徴とする 2 ステージレーザシステム。

18. 前記 2 ステージレーザは、KrF レーザ、ArF レーザ、フッ素分子レーザのいずれかであること

を特徴とする請求の範囲 17 記載の 2 ステージレーザシステム。

## 条約第 19 条 (1) に基づく説明書

本願図 6 で示されるように、シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増幅飽和領域内で変動しても 2 ステージレーザの出力エネルギー（レーザ光のパルスエネルギー  $P_{amp}$ ）には影響が及びません。つまり光発振段を大まかに制御してパルスエネルギー  $P_{osc}$  を増幅飽和領域内（下限エネルギー以上）に収めておけば、光増幅段のみを細かく制御して 2 ステージレーザの出力エネルギーを目標エネルギー  $P_{atgt}$  にすることが可能です。補正後の請求の範囲第 2 項に係る発明はこうした制御に関するものです。

本願図 6 で示されるように、シード光のパルスエネルギー  $P_{osc}$  が増幅飽和領域外の領域内で変動すると 2 ステージレーザの出力エネルギーも変動します。つまり光増幅段を一定制御しておけば、光発振段のみを細かく制御して 2 ステージレーザの出力エネルギーを目標エネルギー  $P_{atgt}$  にすることが可能です。補正後の請求の範囲第 8 項に係る発明はこうした制御に関するものです。

以上のように、本発明は、光発振段、光増幅段の何れか一方を大まかに制御し、他方を細かく制御するものです。2 ステージレーザには多くの複雑な制御（例えば光発振段と光増幅段の放電タイミング制御）があり、処理装置の負担が大きい状況にあります。本発明によれば、出力制御が簡素になるため、処理装置の負担が軽減されます。

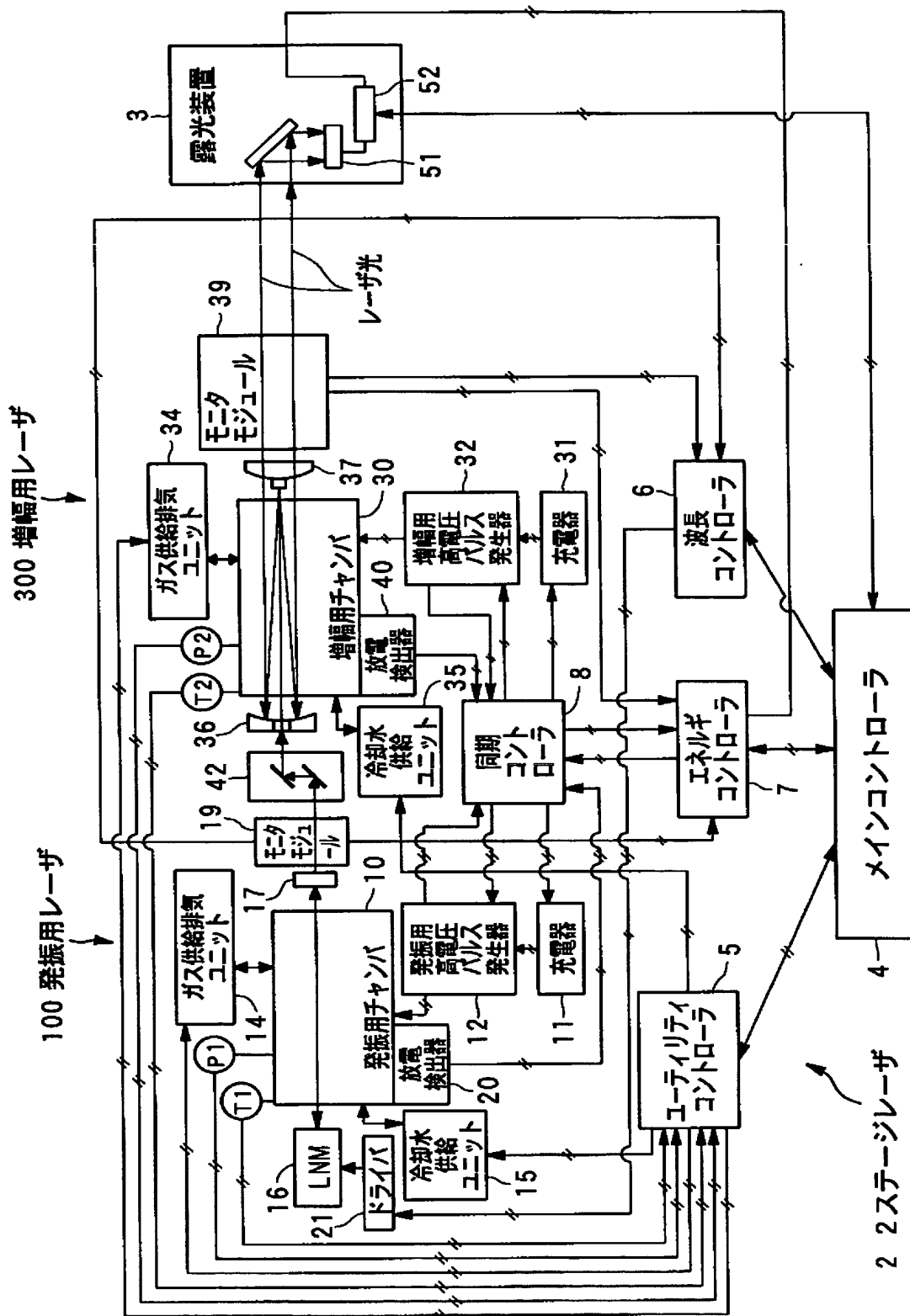
文献 1 ～ 3 には 2 ステージレーザに関する記載があるものの、光発振段と光増幅段をどのように制御してレーザ光を出力するのかに関する記載がありません。光発振段から出力されるパルスエネルギー  $P_{osc}$  を所定範囲で制御すること、すなわち増幅飽和領域内・外の何れかで制御することに関する記載もありません。

文献 4 にはレーザ光の増幅に関する記載があるものの、放電励起型の 2 ステージレーザに関する記載はありません。つまり文献 4 と本発明とは技術分野が異なります。

本発明によれば、2 ステージレーザ特有の問題、すなわち処理装置の負担が大きいという問題を解消することができます。

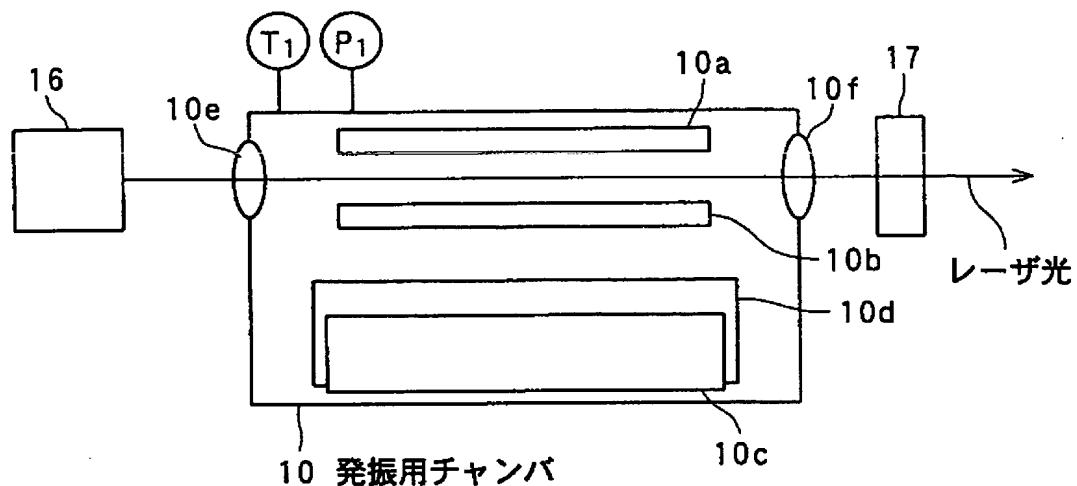
【図1】

本実施形態に係るレーザーシステムの構成図

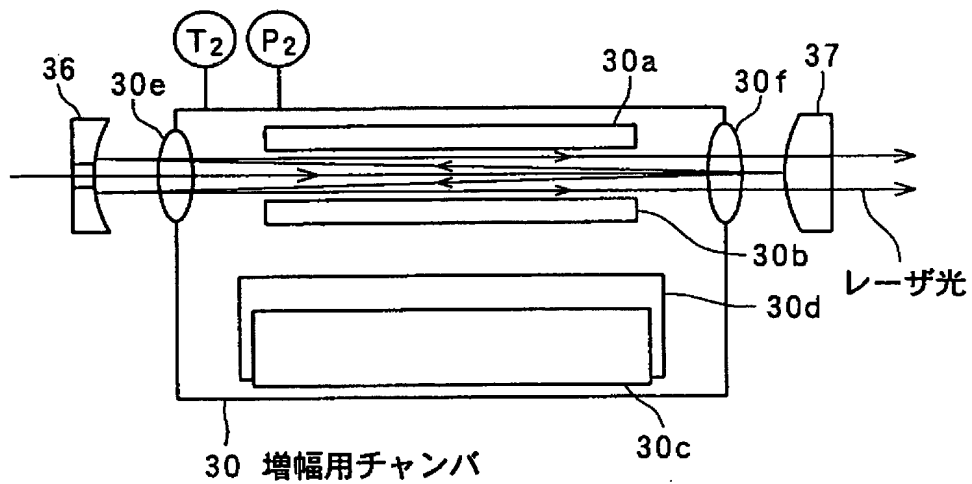


[図2]

各チャンバ及びその近傍の構成図

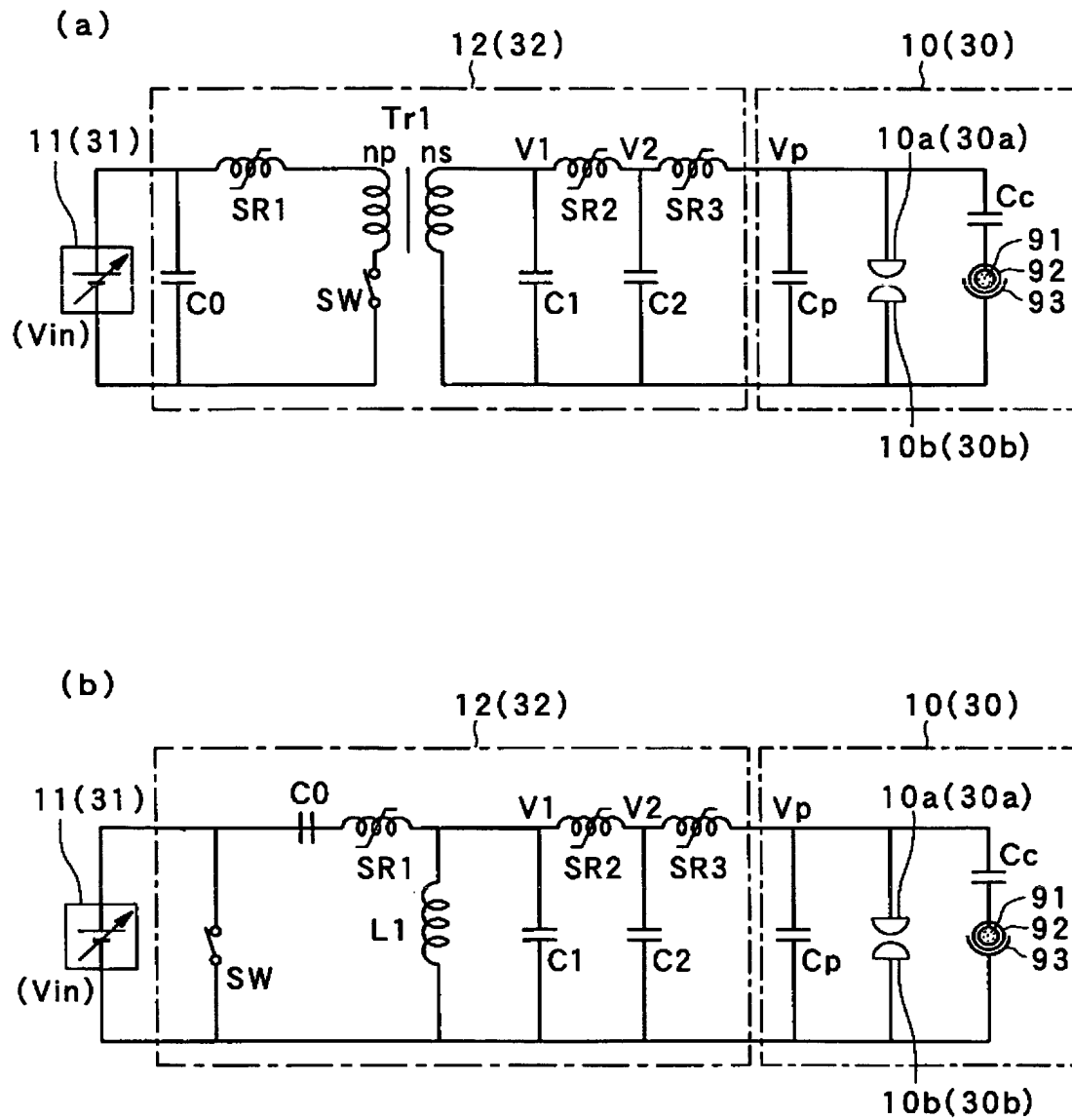


(a)

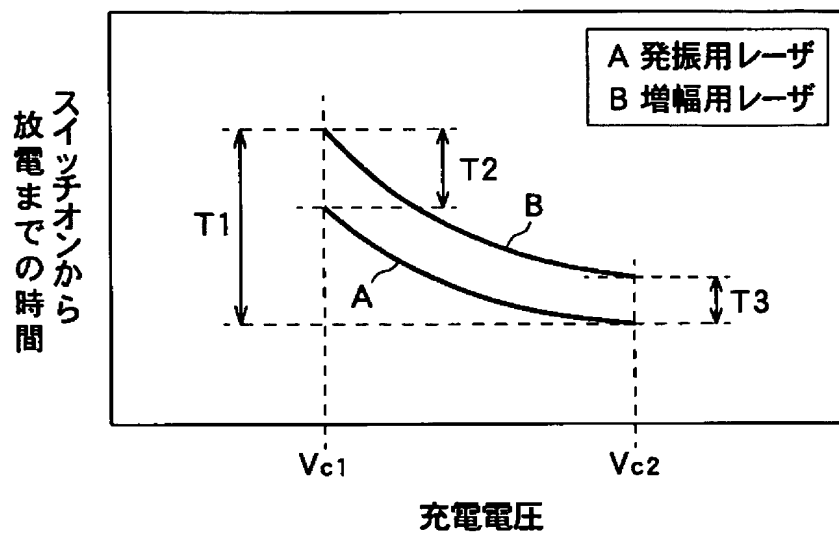


(b)

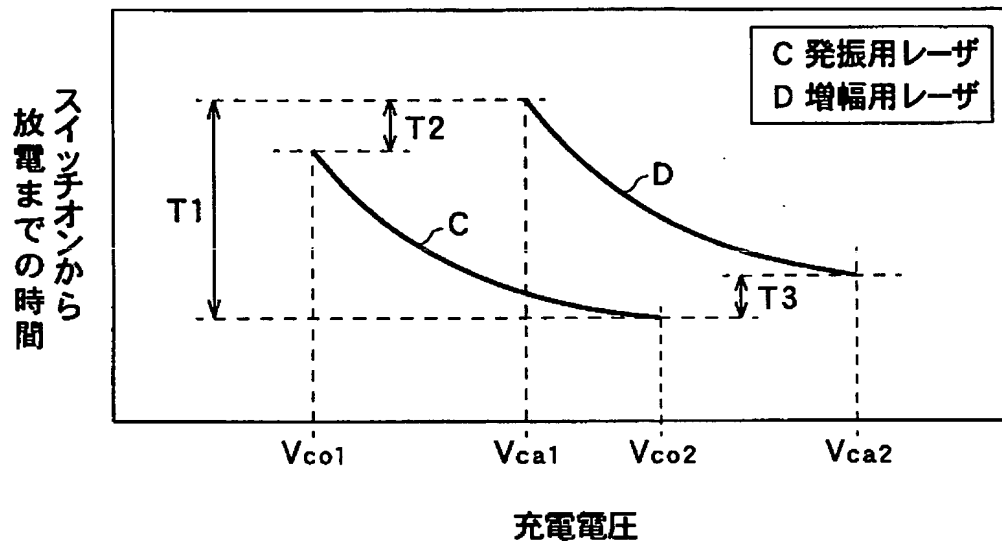
[図3]



[図4]

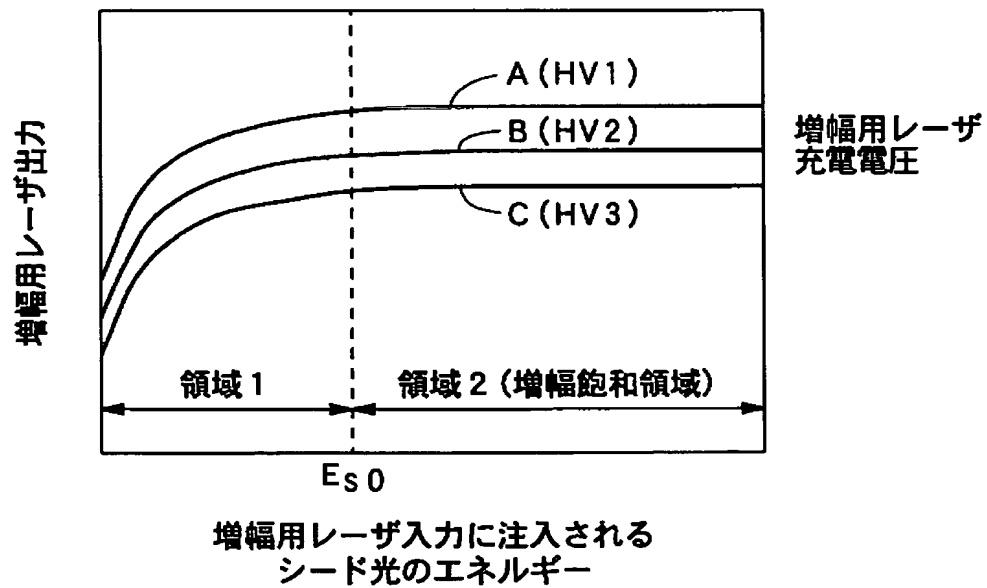


[図5]



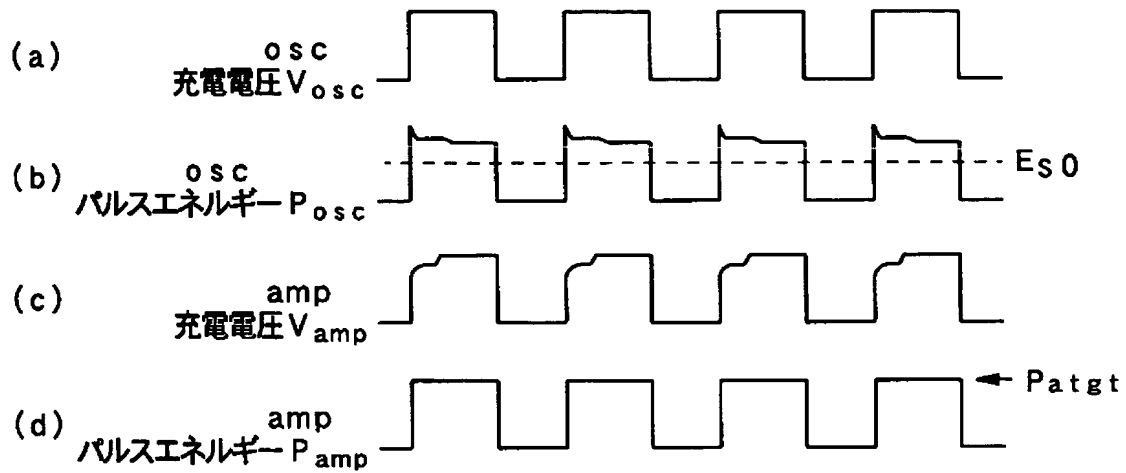
[図6]

増幅用レーザに注入されるシード光のエネルギーと  
増幅後のエネルギーの関係を示す図



[図7]

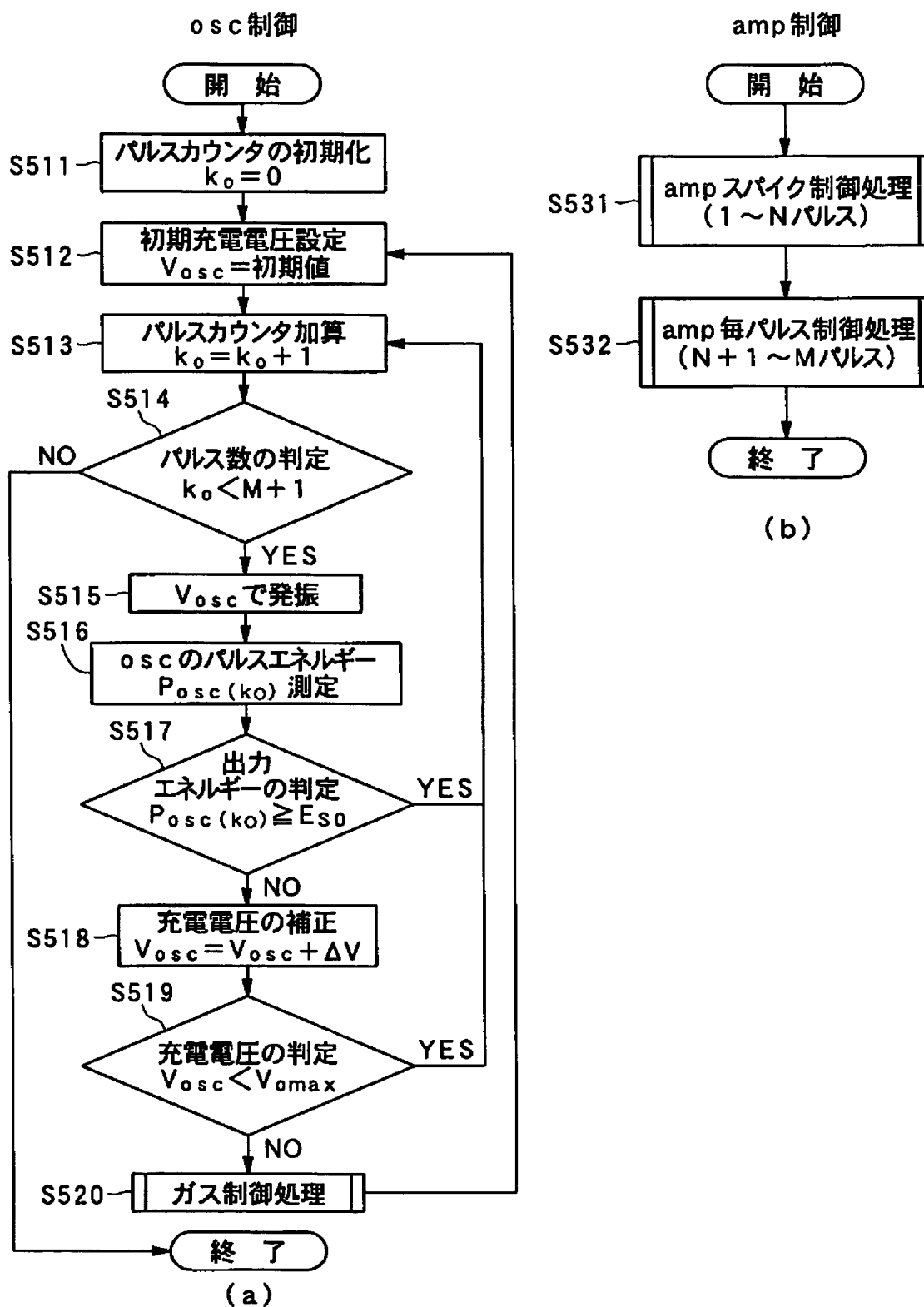
第1の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図





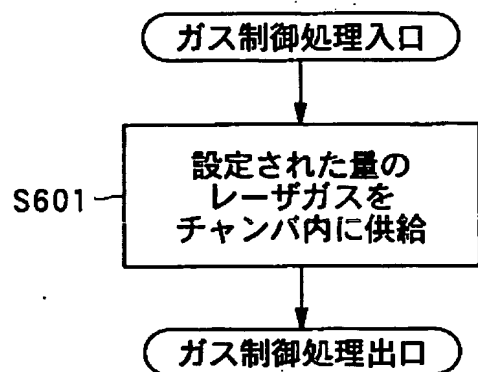
[図8]

## 発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー

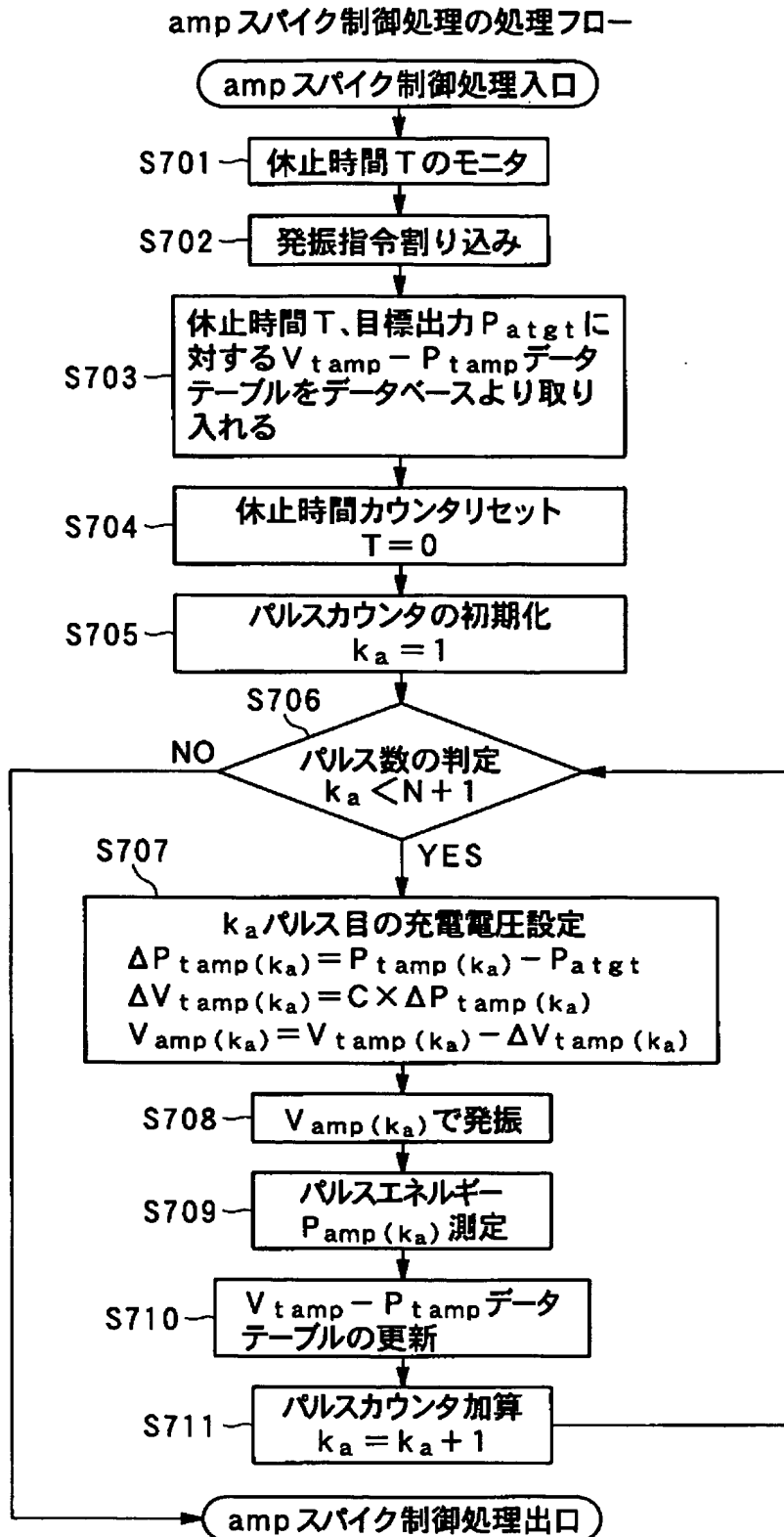


[図9]

## ガス制御処理の処理フロー

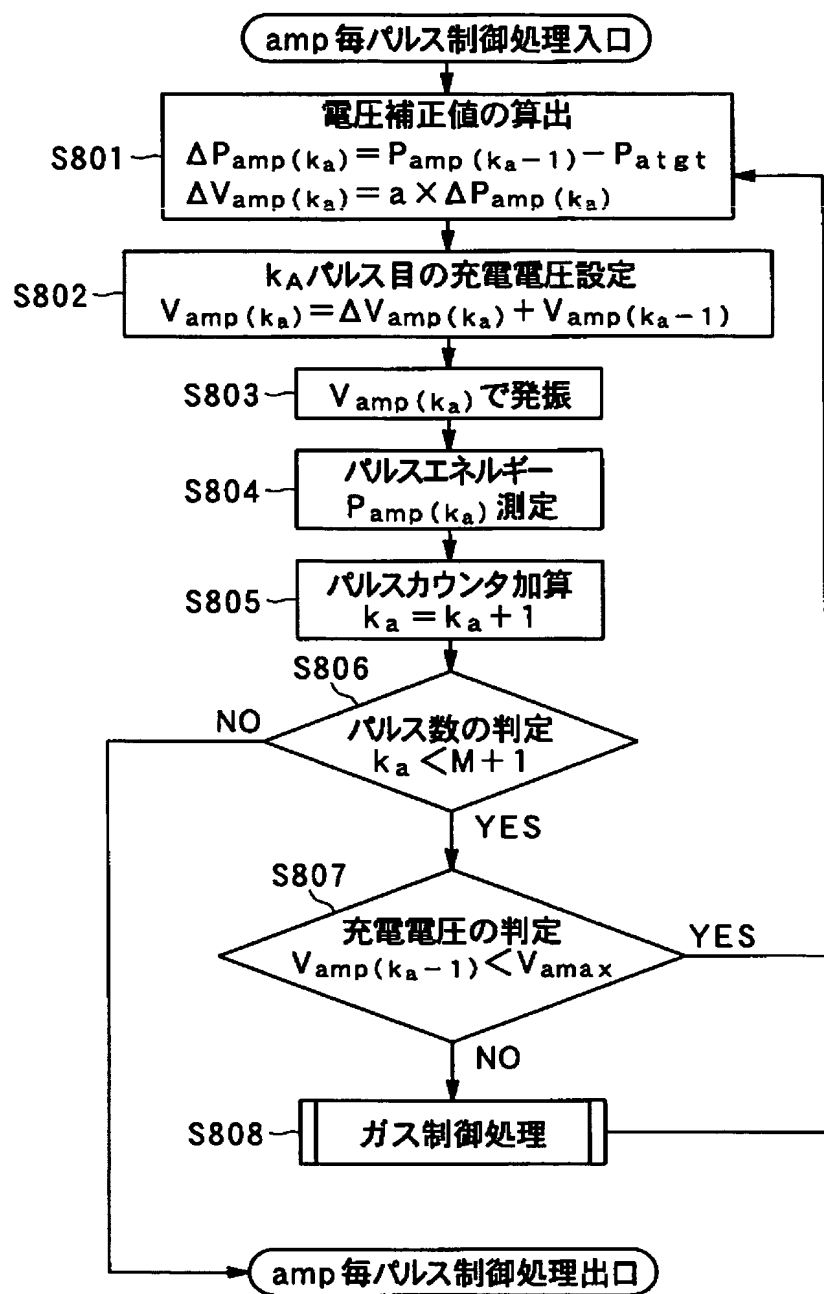


[図10]



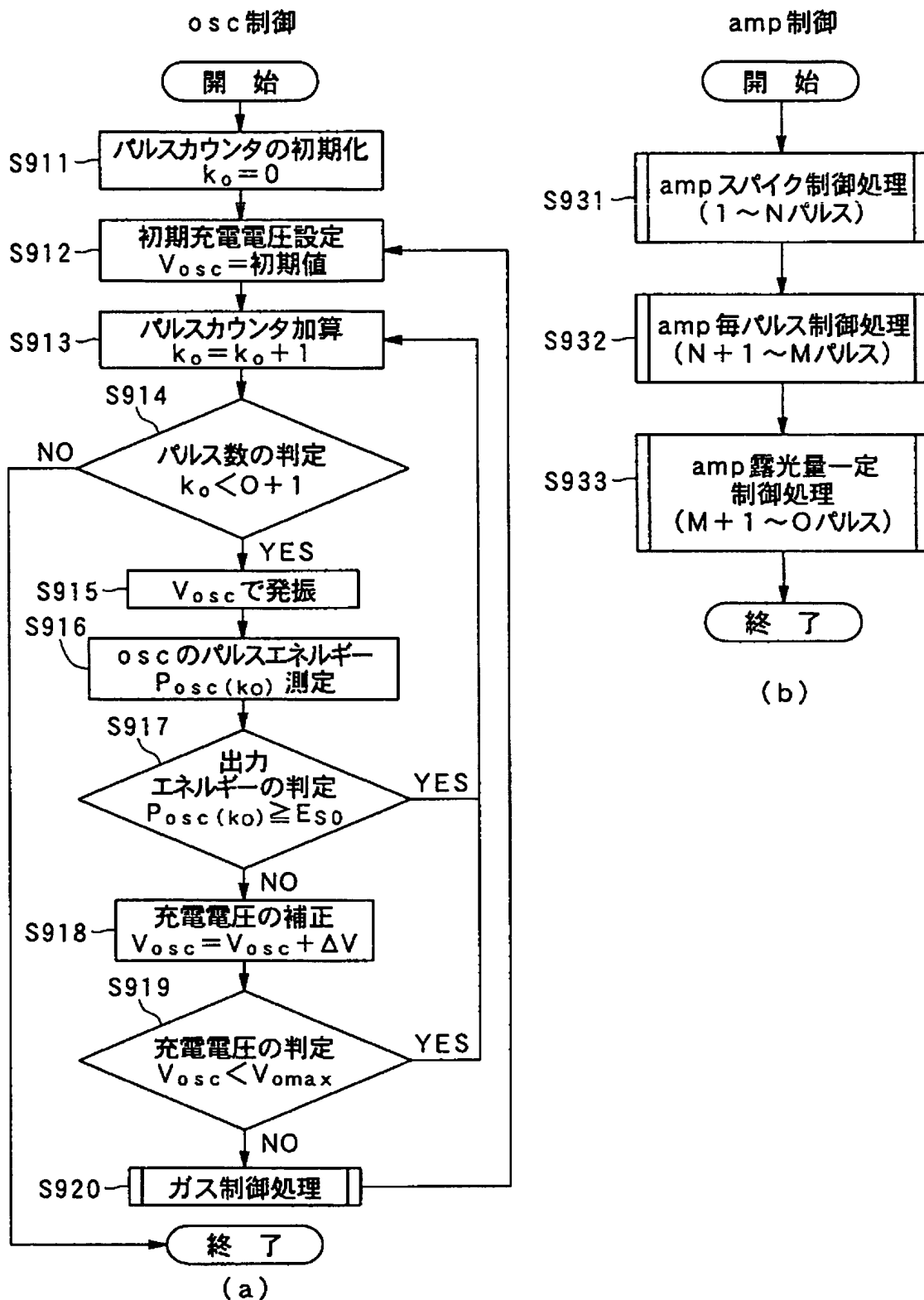
[図11]

## amp 毎パルス制御処理の処理フロー



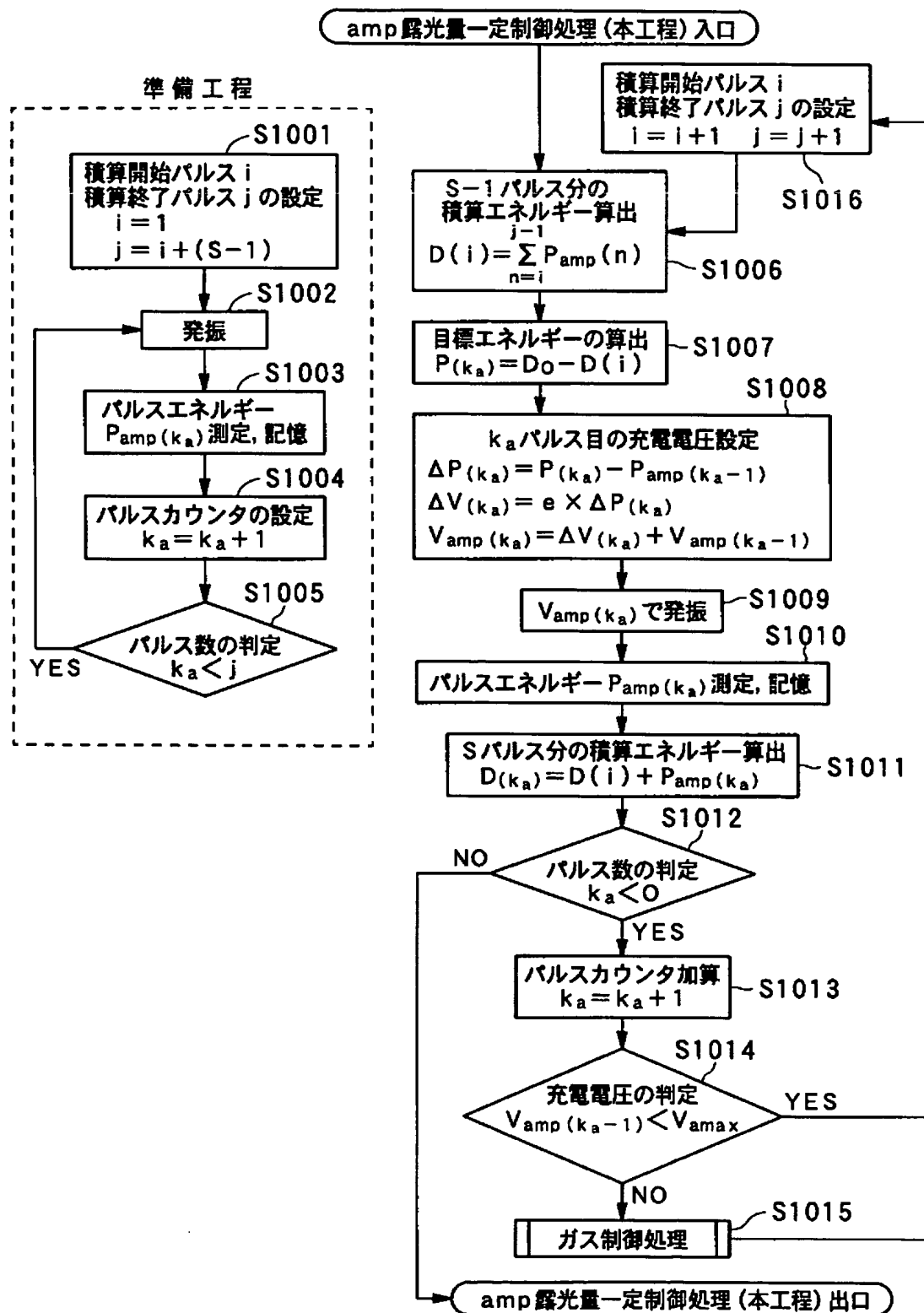
[図12]

## 発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー

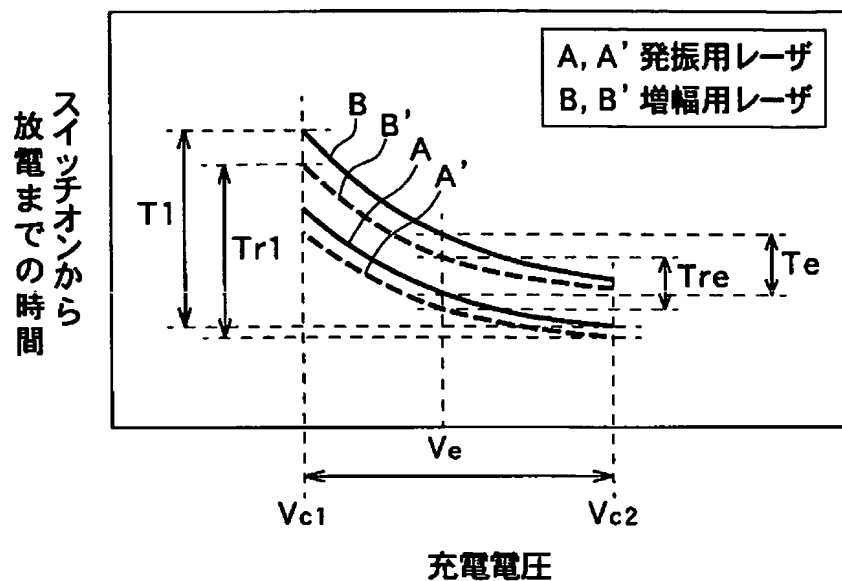


[図13]

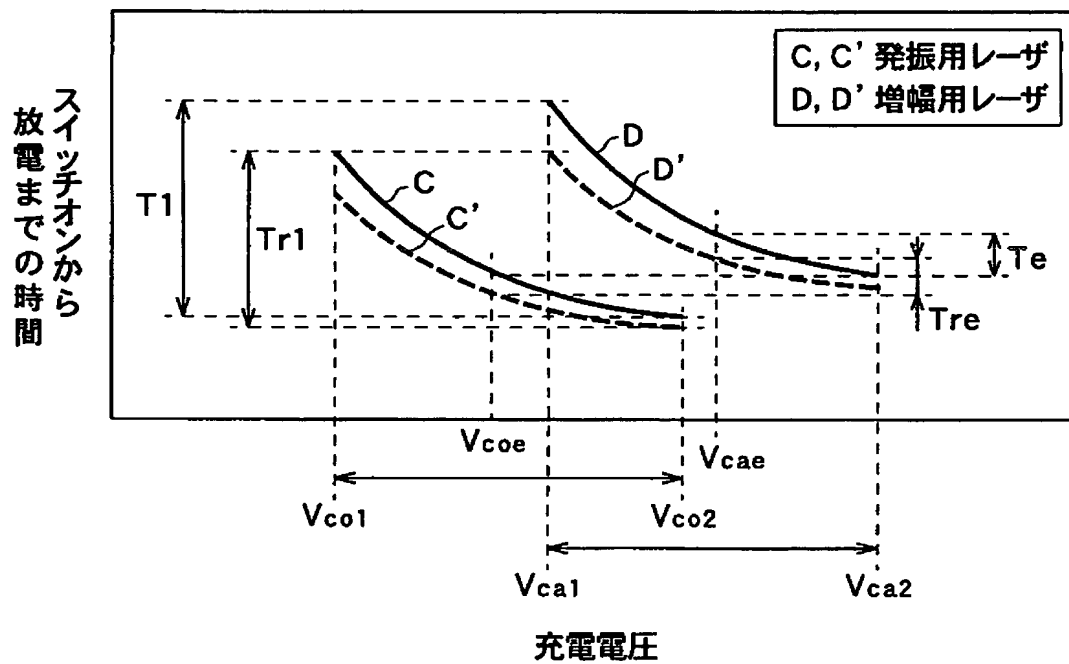
## amp露光量一定制御処理の処理フロー



[図14]

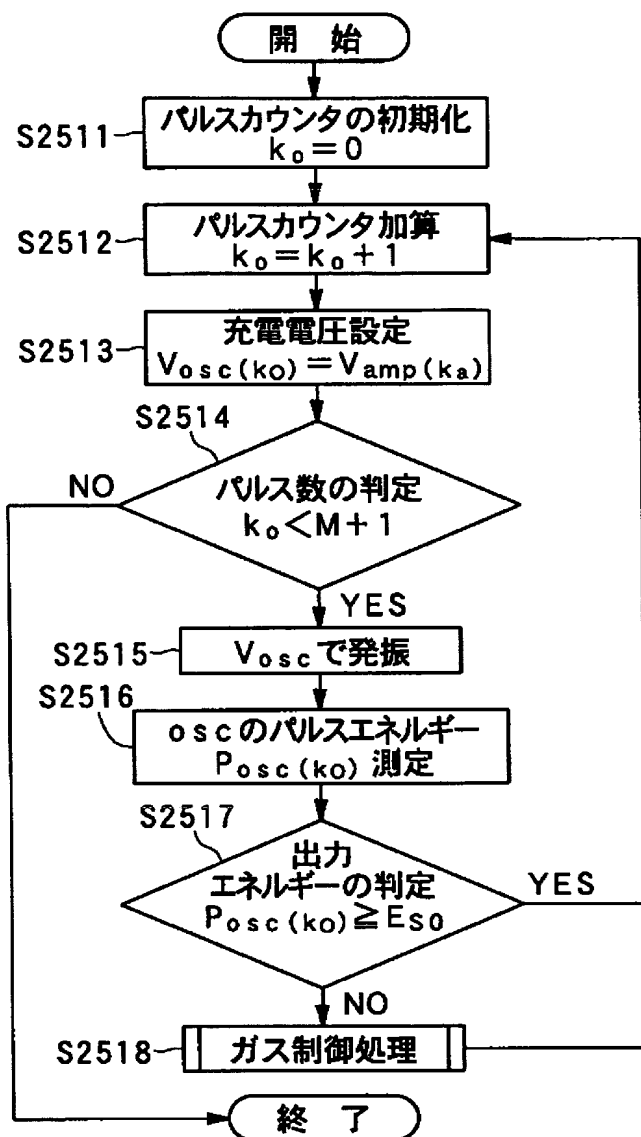


[図15]



[図16]

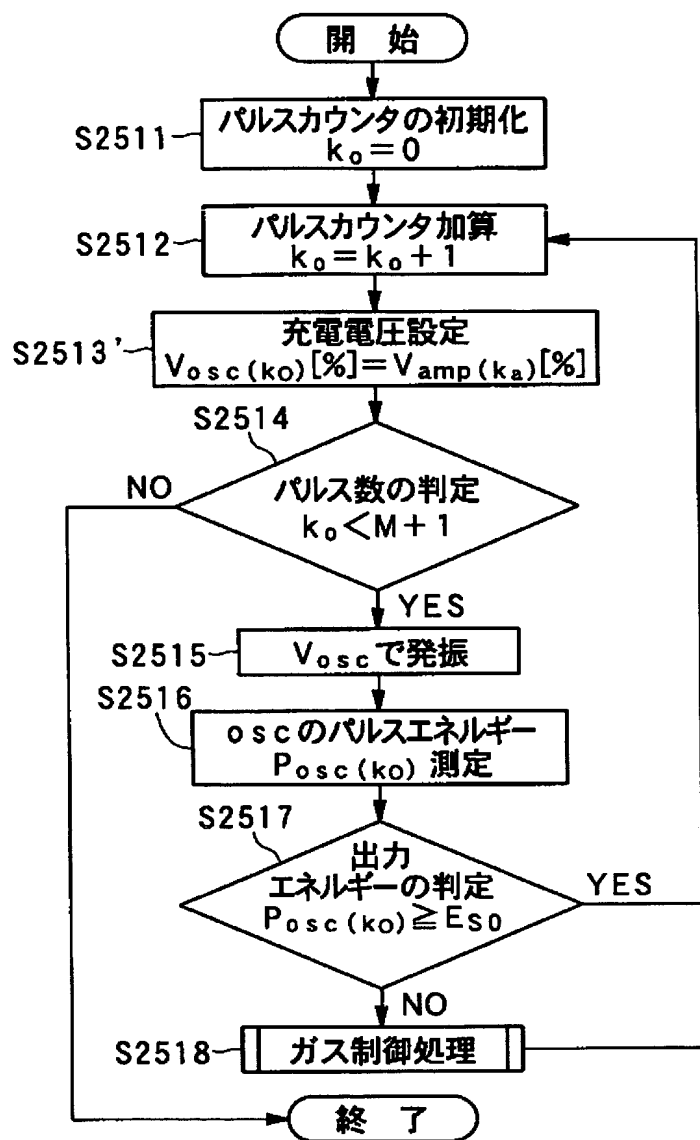
## 発振用レーザの制御フロー





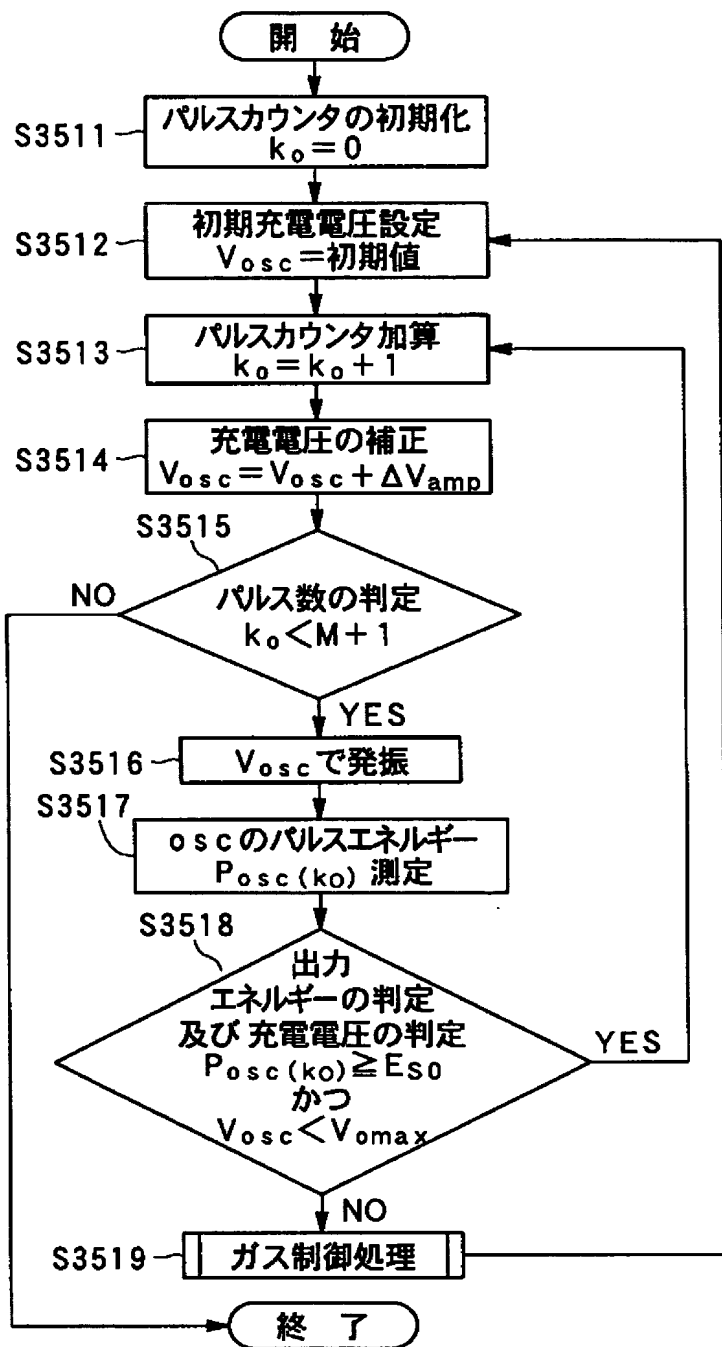
[図17]

## 発振用レーザの制御フロー



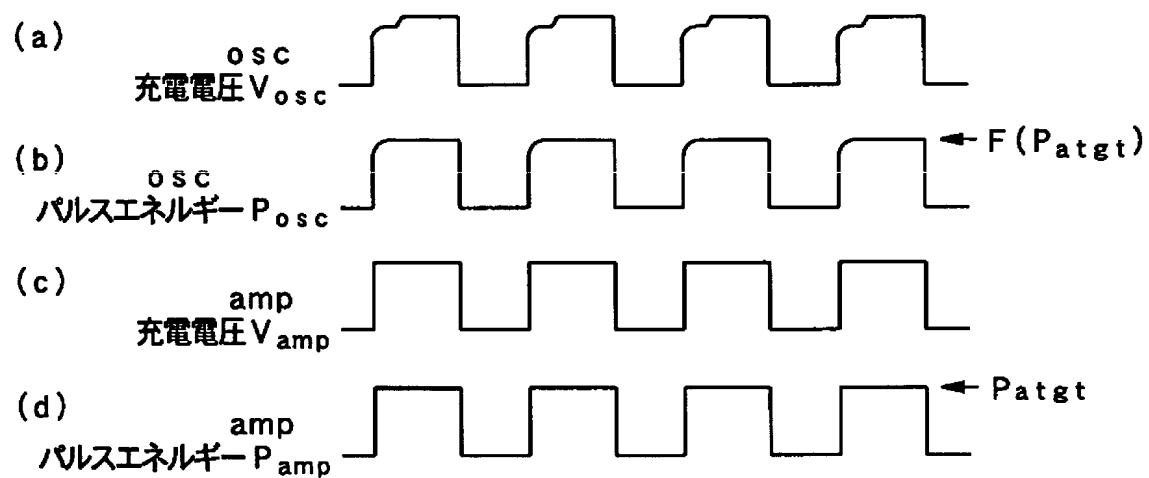
[図18]

## 発振用レーザの制御フロー



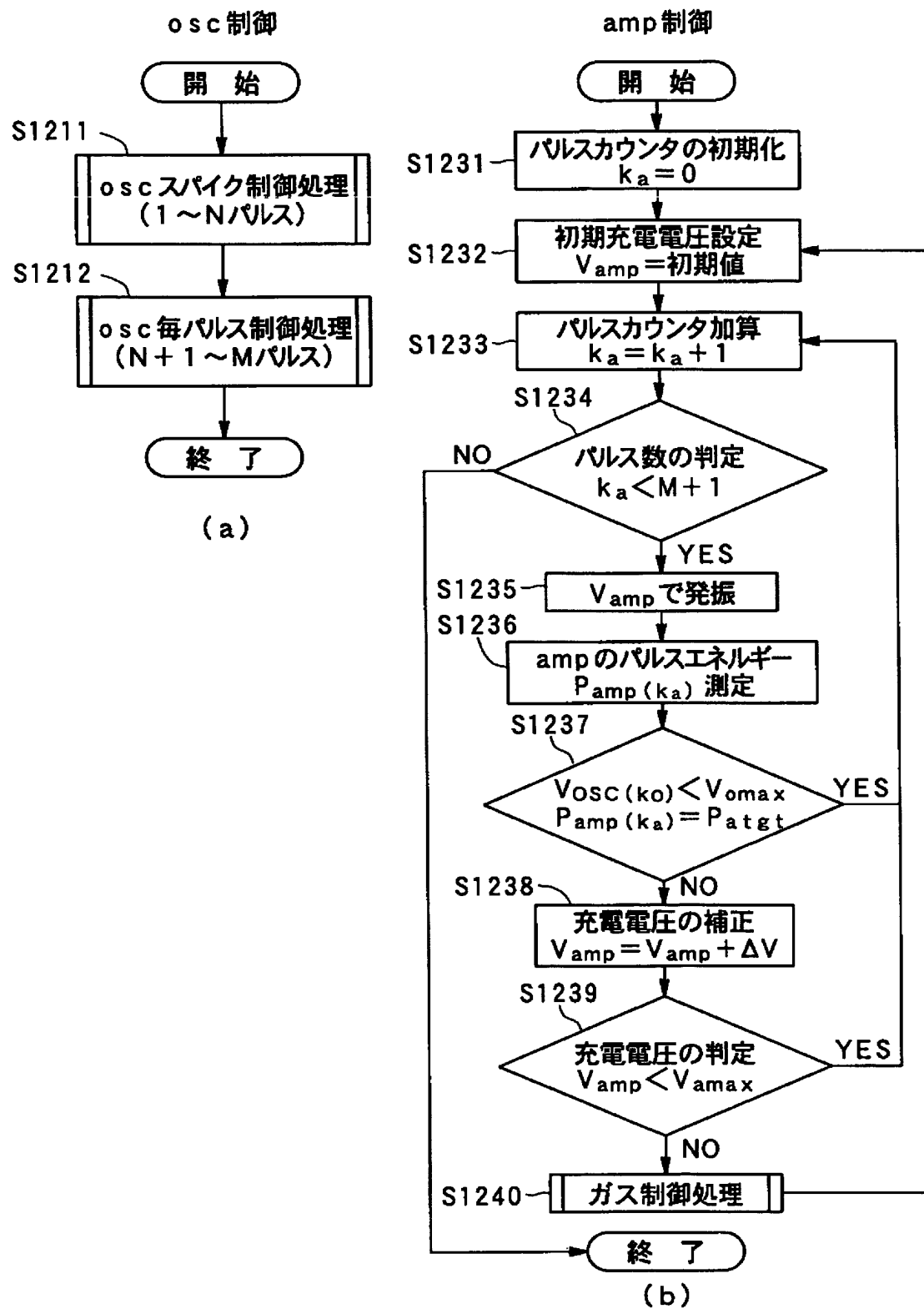
[図19]

第2の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図

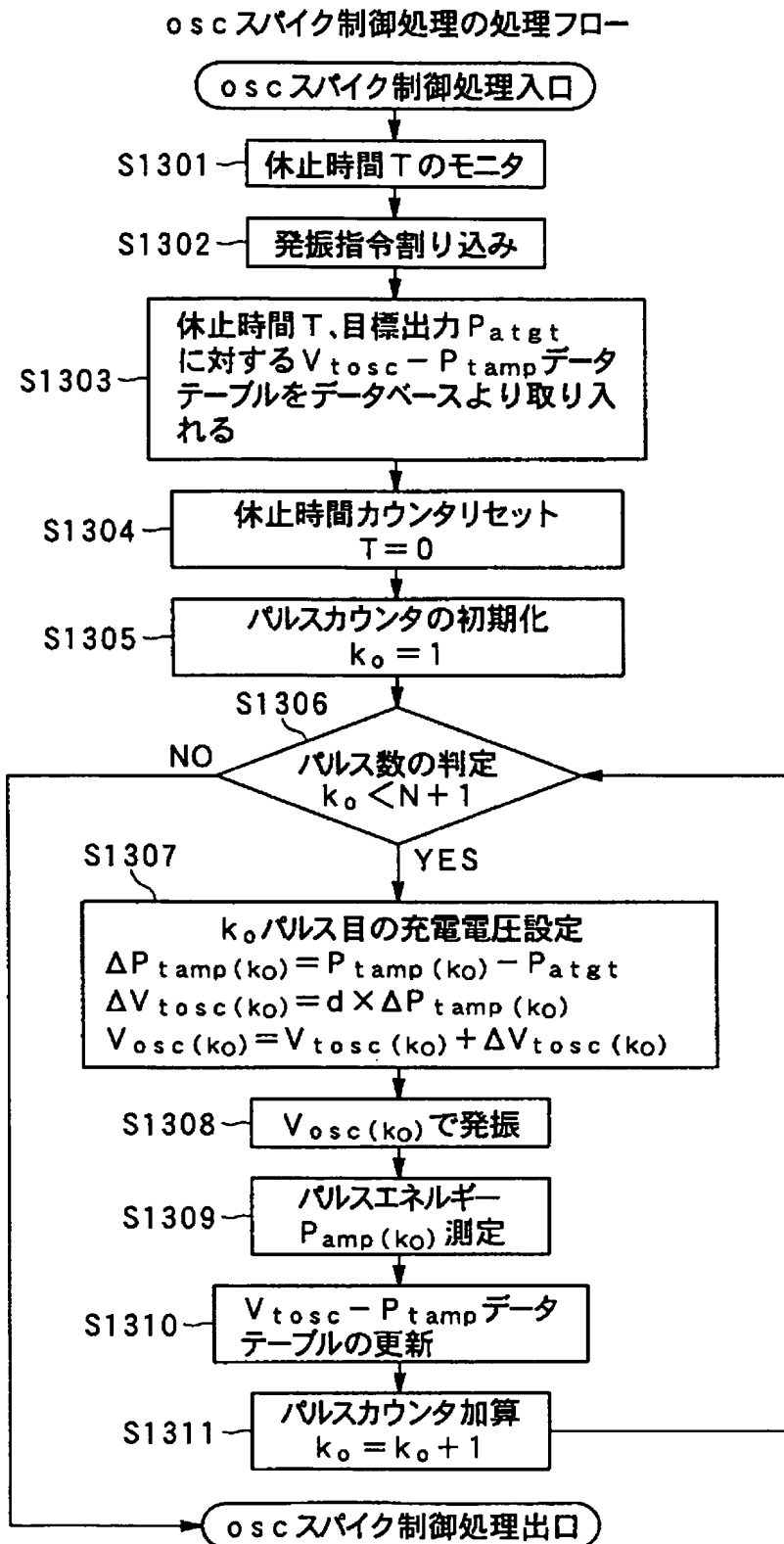


[図20]

## 発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー

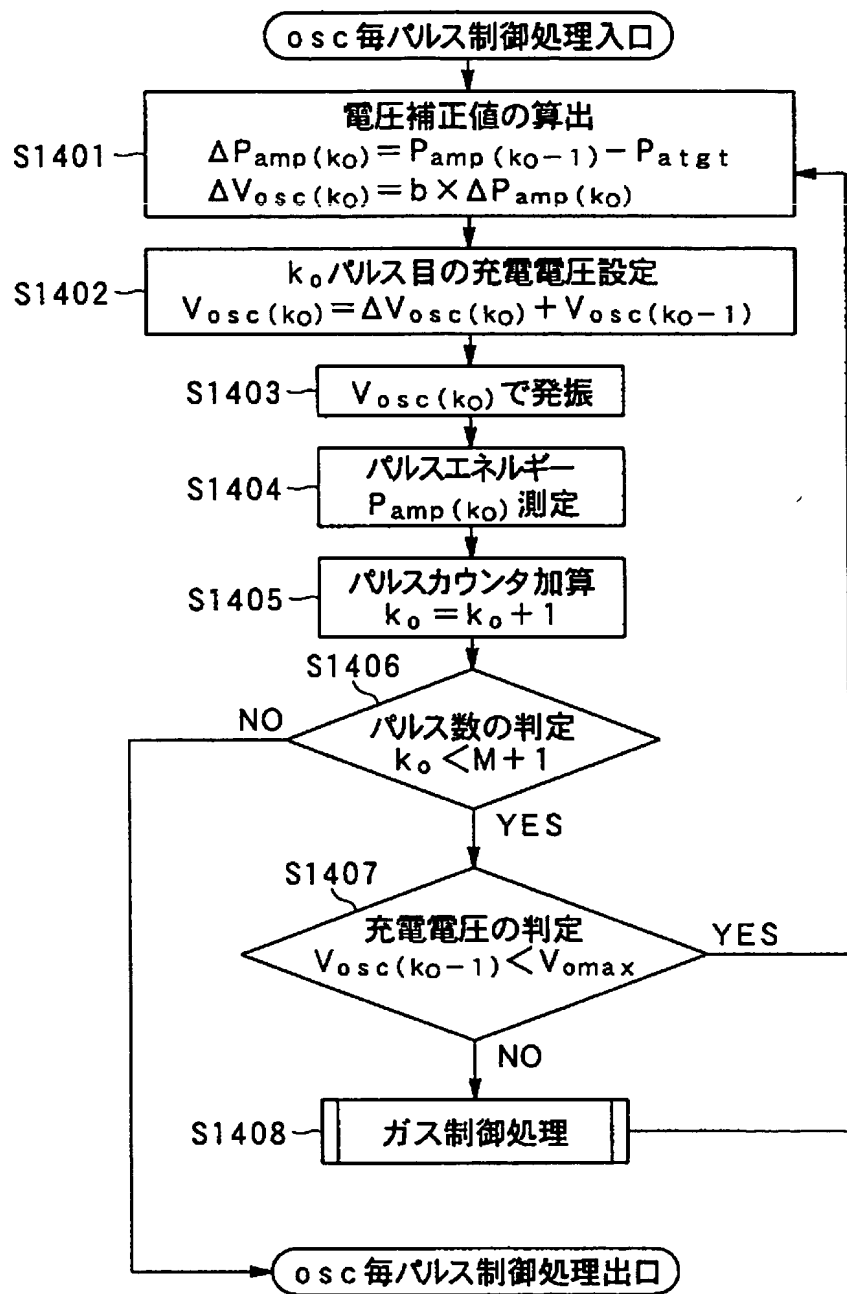


[図21]



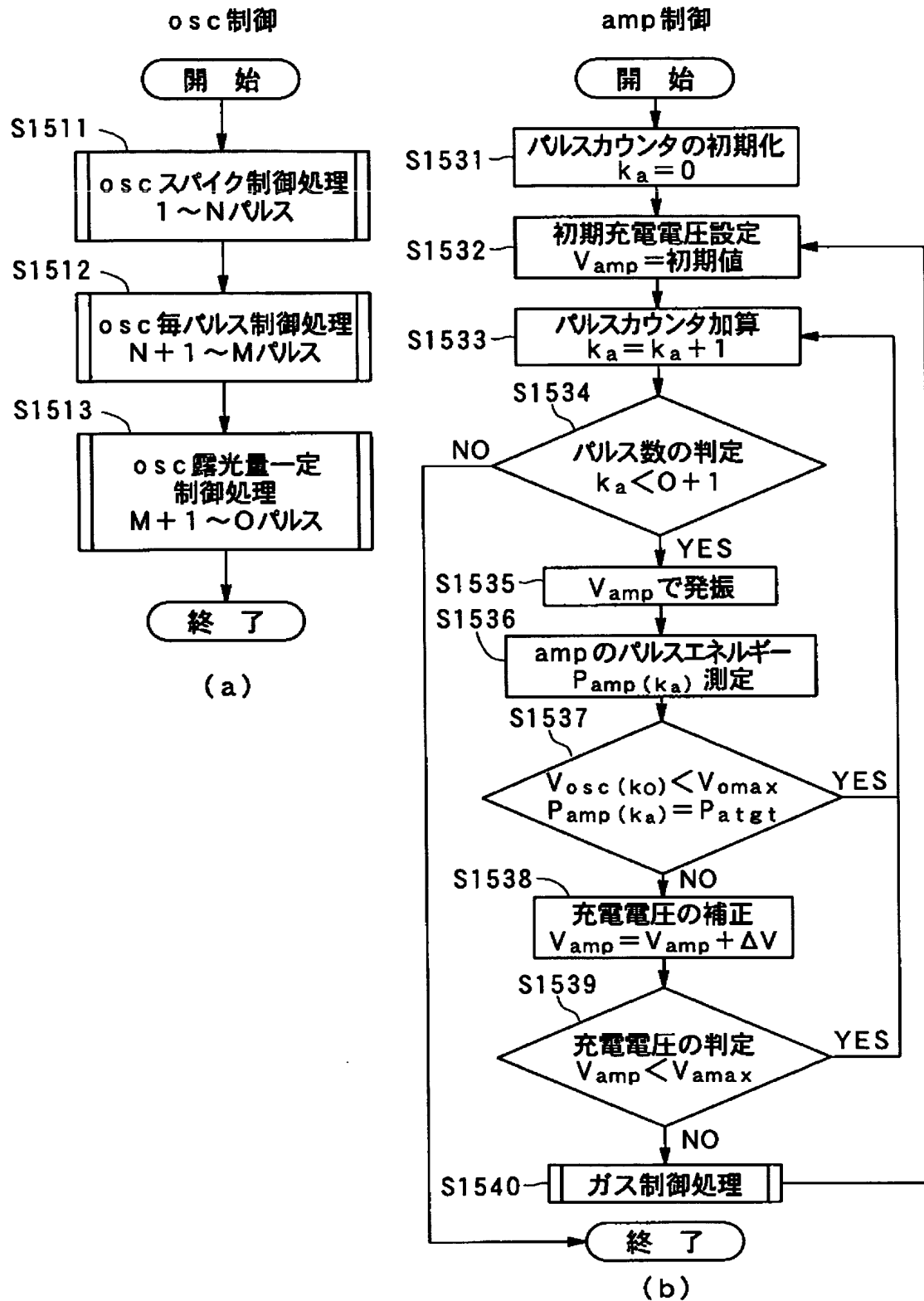
[図22]

## osc 毎パルス制御処理の処理フロー



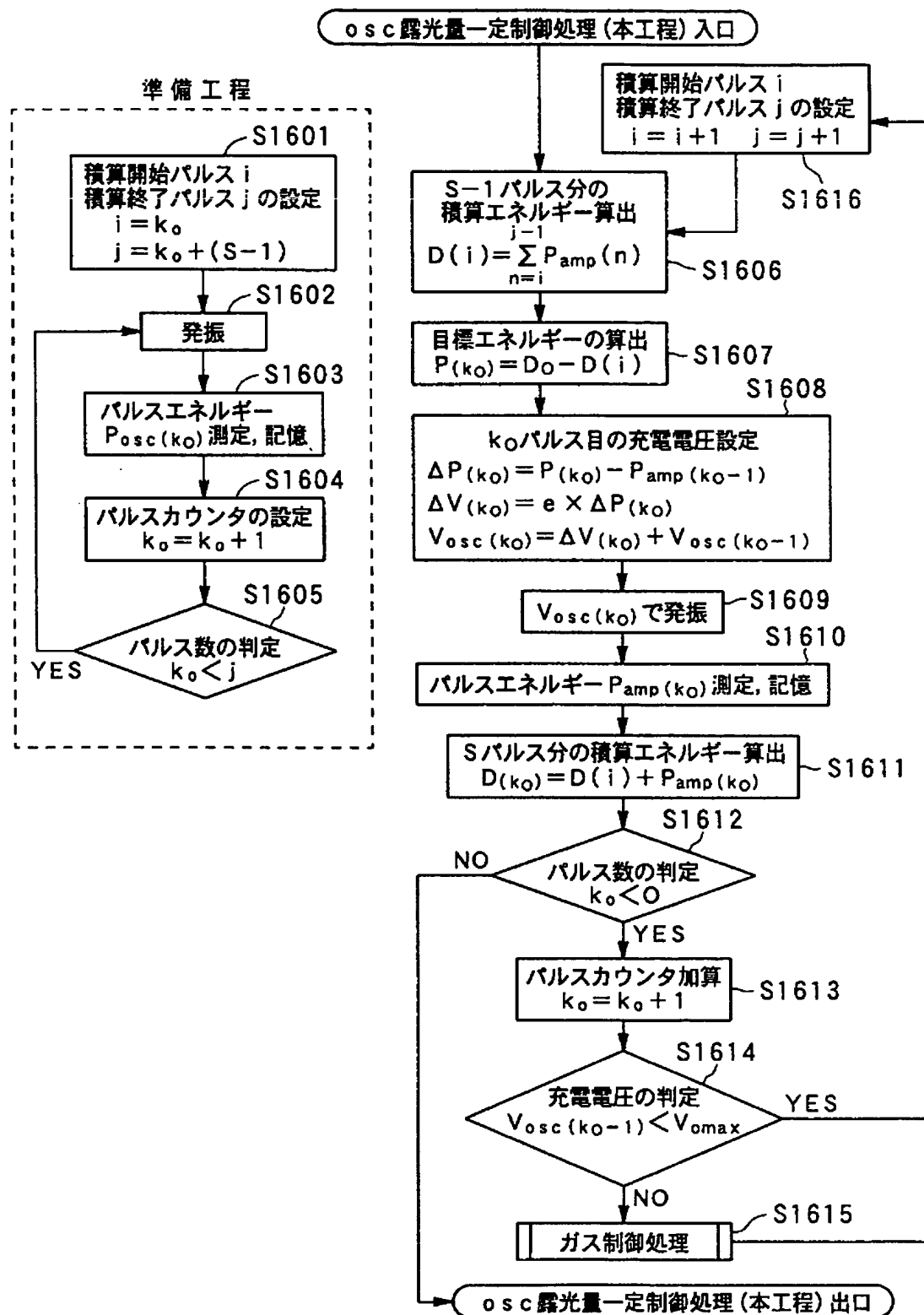
[図23]

## 発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー



[図24]

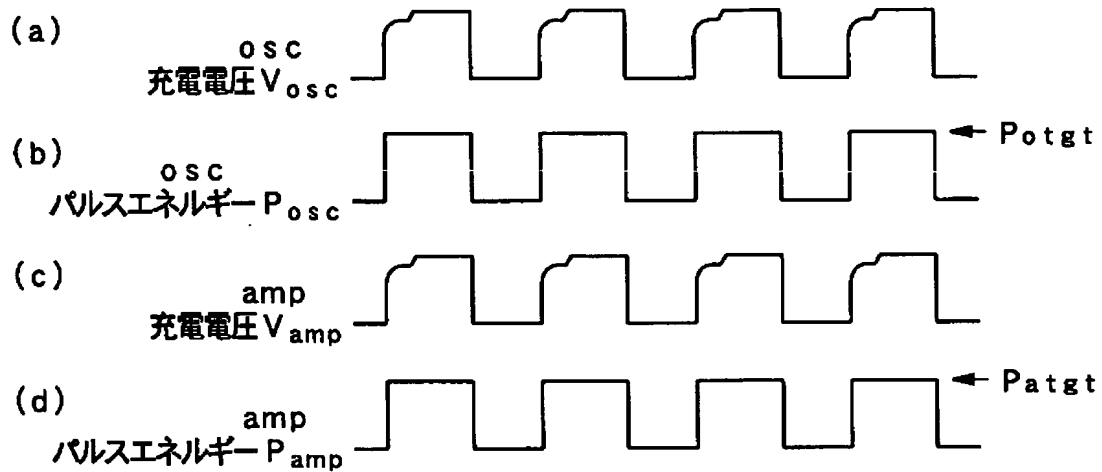
## osc 露光量一定制御処理の処理フロー





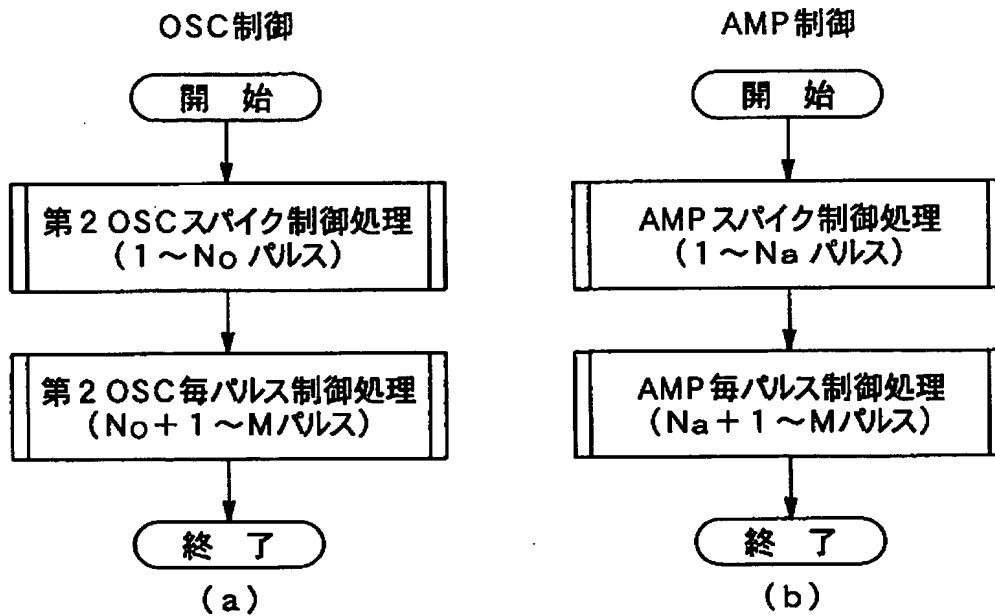
[図25]

第3の制御例における各充電電圧と各パルスエネルギーを示す図



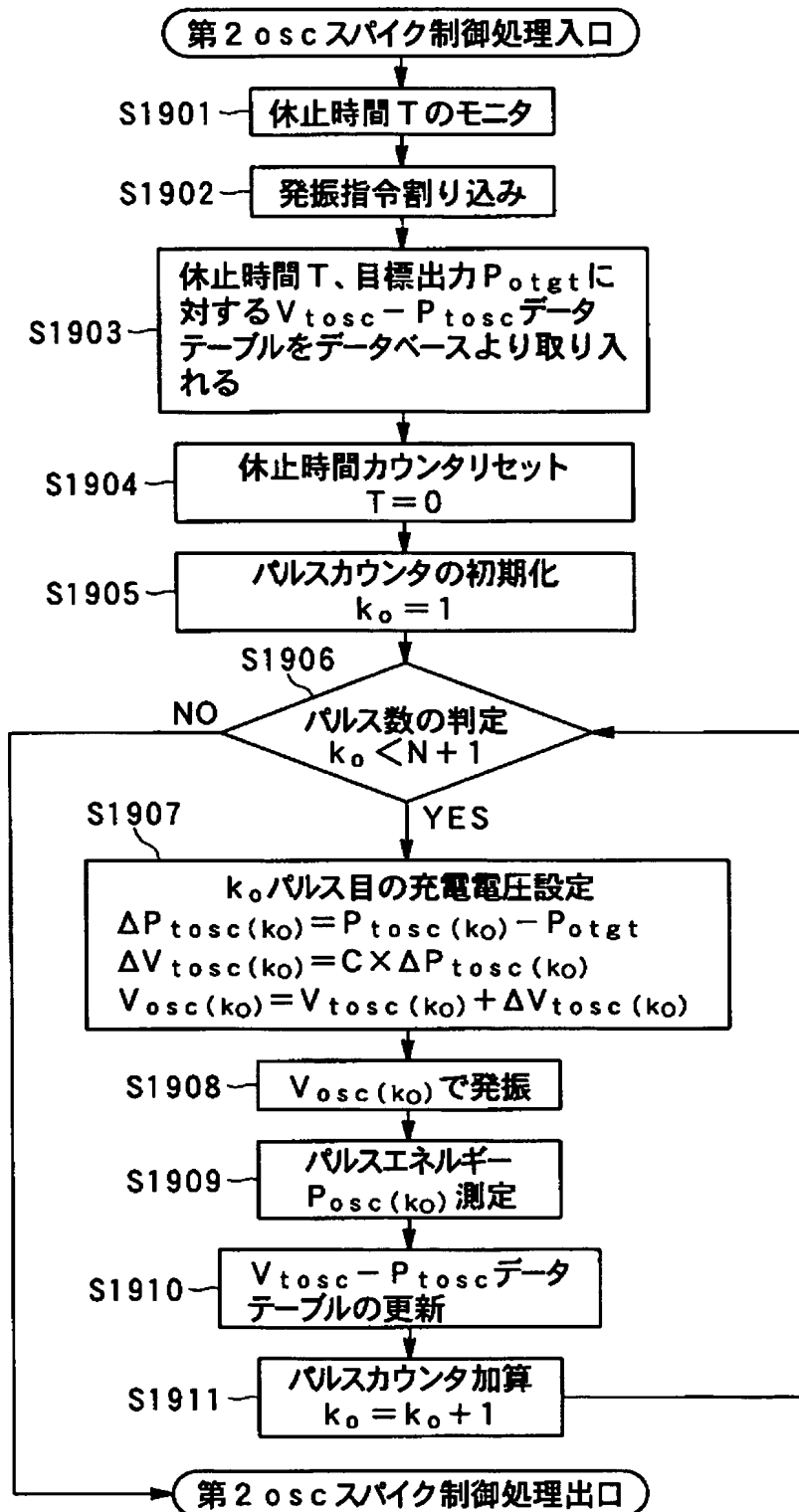
[図26]

発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー



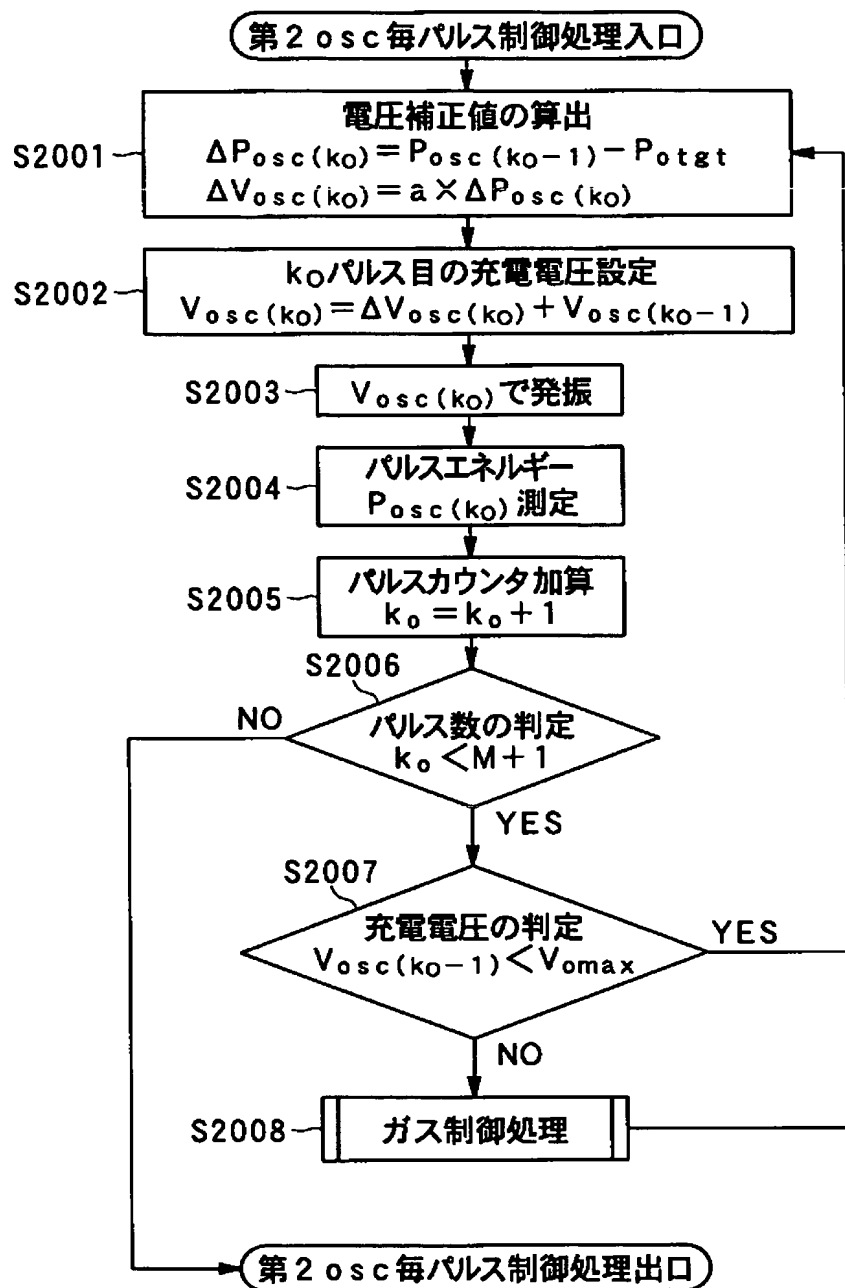
[図27]

## 第2 oscスパイク制御処理の処理フロー



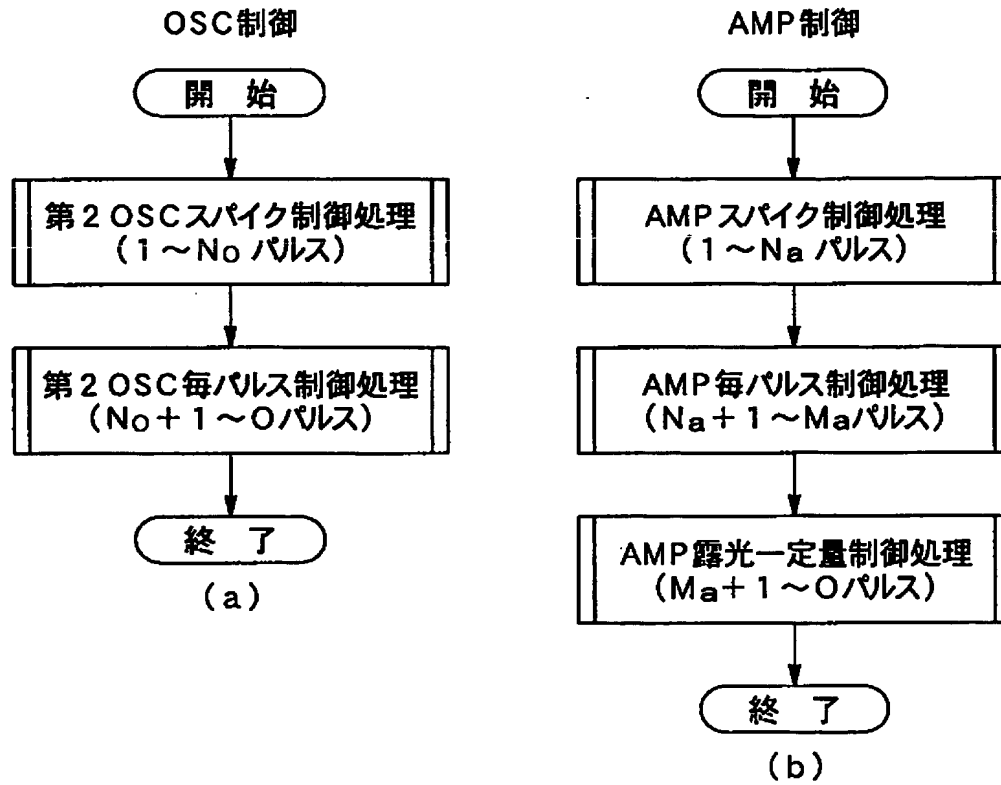
[図28]

## 第2 osc 毎パルス制御処理の処理フロー



[図29]

## 発振用レーザ及び増幅用レーザの制御フロー



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/011434

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> H01S3/134

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> H01S3/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2002-198604 A (Saima Inc.), 12 July, 2002 (12.07.02), Claim 1; Par. Nos. [0008], [0067] to [0068]; Fig. 1 & US 2002/0044586 A1 Claim 1; Par. Nos. [0138] to [0139]; Fig. 1	1, 17, 18 5-7, 8-13
X Y	JP 2003-8119 A (Komatsu Ltd. et al.), 10 January, 2003 (10.01.03), Par. No. [0022]; Fig. 1 & US 2002/0196823 A1 Par. No. [0039]; Fig. 1	14-18 2-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
09 November, 2004 (09.11.04)

Date of mailing of the international search report  
30 November, 2004 (30.11.04)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/011434

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2002-353545 A (Komatsu Ltd.), 06 December, 2002 (06.12.02), Par. No. [0022]; Fig. 1 & US 2002/0141470 A1 Par. No. [0068]; Fig. 1	14-18 2-7
Y	JP 4-312988 A (Scieta Cavi Pirelli S.p.A.), 04 November, 1992 (04.11.92), Par. No. [0029] & EP 439867 A1 Column 5, lines 13 to 27 & US 5638204 A Column 4, lines 46 to 59	2-7
P,X	JP 2004-39767 A (Giga Photon Kabushiki Kaisha et al.), 05 February, 2004 (05.02.04), Par. No. [0028]; Fig. 1 (Family: none)	1,17,18

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> H01S3/134

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> H01S3/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2004年

日本国登録実用新案公報 1994-2004年

日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	JP 2002-198604 A (サイマー インコーポレイテッド) 2002.07.12, 請求項1, 【0008】, 【0067】-【0068】, 図1 &US 2002/0044586 A1, 請求項1, [0138]-[0139], 図1	1, 17, 18, 5-7, 8-13
X Y	JP 2003-8119 A (株式会社小松製作所 他1名) 2003.01.10, 【0022】, 図1 &US 2002/0196823 A1, [0039], 図1	14-18 2-7

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

- 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

- 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09.11.2004

国際調査報告の発送日

30.11.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

河原 正

2X

9017

電話番号 03-3581-1101 内線 3253

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	JP 2002-353545 A (株式会社小松製作所) 200 2. 12. 06, 【0022】, 図1 &US 2002/0141470 A1, 【0068】, 図1	14-18 2-7
Y	JP 4-312988 A (ソシエタ・カピ・ピレリー・ソシエ タ・ペル・アジオニ) 1992. 11. 04, 【0029】 &EP 439867 A1, 第5欄13-27行 &US 5638204 A, 第4欄46-59行	2-7
P, X	JP 2004-39767 A (ギガフォトン株式会社 他1 名) 2004. 02. 05, 【0028】, 図1 (ファミリーなし)	1, 17, 18